



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

GABRIEL LUIZ MORELLATO TRAZZI

ABORDAGENS PARA SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE CADEIA DE
SUPRIMENTOS EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA: SISTEMA BASEADO EM
REGRAS E POR PROGRAMAÇÃO HÍBRIDA

CAMPINAS

Julho de 2018

GABRIEL LUIZ MORELLATO TRAZZI

ABORDAGENS PARA SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE CADEIA DE
SUPRIMENTOS EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA: SISTEMA BASEADO EM
REGRAS E POR PROGRAMAÇÃO HÍBRIDA

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia Química
da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos
requisitos exigidos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Química.

Orientador: Prof^ª. DR^a. MARIA TERESA MOREIRA RODRIGUES

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DEFENDIDA PELO
ALUNO GABRIEL LUIZ
MORELLATO TRAZZI, ORIENTADO
PELA PROF^ª. DR^a. MARIA TERESA
MOREIRA RODRIGUES.

CAMPINAS

Julho de 2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Trazzi, Gabriel Luiz Morellato, 1989-
T699a Abordagens para solução de um problema de cadeia de suprimentos em uma indústria química: sistema baseado em regras e por programação híbrida / Gabriel Luiz Morellato Trazzi. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Maria Teresa Moreira Rodrigues.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Cadeia de suprimentos. 2. Planejamento. I. Rodrigues, Maria Teresa Moreira, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Approaches to solve a chemical industry supply chain problem: rule based system and hybrid programming

Palavras-chave em inglês:

Supply chain

Planning

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Maria Teresa Moreira Rodrigues [Orientador]

Roger Josef Zemp

Washington Alves de Oliveira

Data de defesa: 30-07-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de mestrado defendida pelo aluno Gabriel Luiz Morellato Trazzi e aprovada em 30 de julho de 2018 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof^a Dr^a Maria Teresa Moreira Rodrigues

Prof Dr Roger Josef Zemp

Prof Dr Washington Alves de Oliveira

A ata de defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no processo de vida acadêmica do aluno.

Resumo

A Gestão da Cadeia de Suprimentos, metodologia com grande avanço e desenvolvimento no começo dos anos 90, tem como objetivo intensificar os benefícios e lucros de um sistema integrado de suprimento, produção e distribuição. A partir desse conceito, estratégias e decisões não são mais elaboradas sob a perspectiva de uma companhia somente, mas sim de todo o sistema de produção. Na literatura é comum encontrar diversas definições sobre essa metodologia de gestão, porém a maioria converge em ressaltar que esse sistema é altamente focado nas relações que existem entre toda a cadeia produtiva para prover o melhor nível de serviço ao cliente com o menor custo possível, construindo assim uma estrutura competitiva, interligando o mundo inteiro e sincronizando suprimento e demanda, conferindo performances globais. Dois elementos muito importantes na Gestão da Cadeia de Suprimentos serão estudados nesse trabalho, sendo eles: planejamento de demanda e ordem de compra, baseados em previsões de venda (sales forecast) por períodos definidos e controle de inventário; e a gestão da produção, envolvendo o planejamento e o sequenciamento dos produtos. A modelagem desses elementos é considerada por muitos como o maior desafio para os problemas de cadeia de suprimentos nos processos industriais, devido à alta complexidade e número de variáveis. Existem muitos estudos que vem tentando solucionar diferentes tipos de problemas como os citados anteriormente, com uma extensa gama de propostas para soluções, sendo essas puramente matemáticas ou híbridas, que utilizam de regras ou heurísticas. Diversos artigos sobre planejamento e sequenciamento da produção buscam por um indicador adequado para a otimização de sistemas de cadeia de suprimentos. Os mais encontrados são os de viés econômico, baseado no custo total da cadeia de produção no período estabelecido para o problema e a visão do cliente, baseado no nível de satisfação do cliente, podendo ser o tempo de entrega (lead time) ou percentual de atendimento. O objetivo desse trabalho é estudar duas abordagens diferentes para um problema de planejamento e sequenciamento de produção multiproduto, com um reator compartilhado, visando a otimização do atendimento ao cliente com o menor custo possível. A primeira abordagem é a de um sistema baseado em regras específicas e a segunda é uma solução com um sistema híbrido de modelagem matemática e heurística.

Palavras Chave: Cadeia de Suprimentos, Planejamento, Sequenciamento.

Abstract

Supply Chain Management, methodology with great improvement and development in early 1990, aims intensify profits and benefits in an integrated supply, production and distribution systems. From this concept, strategies and decisions are no longer created internally, but considering now a whole production chain. In literature is usual to find many definitions about this management methodology, but the majority emphasizes that this system is highly focused in the whole chain relationship to provide the best service level to customers, with lower possible price, building up a competitive structure and connecting the world. Two elements that are very important in Supply Chain Management will be studied in this paper: demand planning and purchase order, based on sales forecast and inventory control; and production management involving production scheduling. Modeling those elements is considered by many as the biggest challenge in industrial supply chain problems, due to the high complexity and quantity of variables. There are many studies trying to solve different kinds of problems with a huge variety of approaches to solve them, that could be purely mathematical or hybrid, using rules or heuristics. Several articles regarding production planning and scheduling search for a precise indicator to supply chain systems optimization. The most common ones are related to costs or profits, and customer satisfaction. This work objective is study two different approaches for a multi-product production planning and scheduling problem, with a single reactor shared, aiming optimize customer satisfaction with the lower possible cost. The first approach is a rule-based system and the second one is a hybrid system, containing mathematical model and heuristics.

Key Words: Supply Chain, Planning, Scheduling

Sumário

1.	Introdução	8
2.	Objetivos.....	12
3.	Revisão bibliográfica.....	13
3.1.	Supply Chain.....	13
3.2.	Indústria Química e Cadeia de Suprimentos.....	16
3.3.	Estrutura de uma Cadeia de Suprimentos	18
3.4.	Abordagens para Solução de Problemas de Cadeia de Suprimentos.....	24
3.4.1.	Dimensionamento de lotes – Lot sizing	25
3.4.2.	A Representação do Tempo e Horizonte Rolante	27
3.4.3.	Otimização Matemática	28
3.4.4.	Métodos de Busca em Árvore e Branch and Bound.....	37
3.4.5.	Redes Neurais aplicadas à otimização.....	41
3.4.6.	Heurísticas	42
3.4.7.	Aplicações Encontradas na Literatura	44
3.4.8.	Conclusão	45
4.	Propostas de Abordagens para Solução de Problemas de Cadeia de Suprimentos	46
4.1.	Indústria Química e Cadeia de Suprimentos.....	48
4.2.	Propostas de Solução	50
4.3.	Abordagem Heurística	51
4.4.	Abordagem Híbrida	53
4.4.1.	Planejamento	56
4.4.2.	Sequenciamento.....	58
5.	Exemplo de Aplicação.....	61
5.1.	Processo Produtivo	61
5.2.	Estrutura de Demanda.....	66
5.3.	Estrutura de Custos	70
5.4.	Objetivos do Problema.....	71
5.5.	Resultados Obtidos	71
5.6.	Análise dos distúrbios.....	75
6.	Conclusões.....	84
7.	Referências Bibliográficas.....	85

1. Introdução

A globalização e a rapidez com que os negócios são realizados no mundo corporativo têm gerado diversas mudanças no processo de gestão de várias empresas ao redor do mundo, independente da sua natureza, porte e origem. Acompanhando essas mudanças, uma área passou a ter papel fundamental para o aumento da competitividade das empresas, o setor logístico. Juntamente a este, surgiram vários outros sistemas de gestão, incluindo o Supply Chain Management (Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos – SCM).

O Supply Chain Management (SCM) começou a se desenvolver bruscamente no início dos anos 90 e, mesmo a nível internacional, muitas são as empresas que não empregam todos os conceitos de forma correta ou possuem total conhecimento de seus impactos e consequências (Stadtler e Kilger, 2004). O SCM busca intensificar os benefícios de uma gestão integrada da cadeia de suprimentos. Assim, as estratégias e as decisões deixam de ser formuladas e firmadas sob a perspectiva de uma única empresa, mas sim da cadeia produtiva como um todo. Essa metodologia introduz uma mudança no modelo competitivo, à medida que considera que cada vez mais a competição no mercado ocorrerá no nível das cadeias produtivas e não apenas no nível das unidades de negócios isoladamente.

Atualmente vê-se que as margens de lucratividade se tornam cada vez menores para muitas empresas devido à intensa demanda por preços mais baixos. Sabe-se que a competitividade entre as empresas e a motivação para a melhoria contínua de seus processos é que as torna vivas no mercado, portanto, projetos que visam à reformulação da cadeia de suprimentos são muito frequentes nos últimos anos e estão se mostrando bastante eficientes quanto a cortes de custos logísticos e operacionais.

Em uma cadeia de suprimentos orientada para o cliente a aquisição e as políticas de produção devem ser coordenadas de forma eficiente para alcançar um alto nível de serviço a baixo custo. Esse controle pode ser atingido por programação integrada de fábrica e fornecimento de matérias-primas e de manufatura dos produtos acabados. Tal processo em conjunto da cadeia de suprimentos visa atingir o nível máximo de serviço ao cliente juntamente com o menor custo possível.

Vários estudos na literatura, que serão apresentados nos próximos capítulos deste trabalho, apresentam soluções e algoritmos voltados para a resolução dos complexos

problemas de otimização desses sistemas de programação e planejamento de produção. Alguns artigos expõem as dificuldades de se estudar sistemas integrados de SCM, desde o fornecimento até a distribuição aos mercados consumidores, para empresas multi sites e com vários tipos de abastecedores e armazéns. Outras fontes estudam as integrações entre setores de uma empresa visando uma ferramenta de otimização de ganho econômico, fundindo uma única função objetivo para mais de um caso de estudo.

A luta por competitividade no ambiente corporativo cresce de modo acelerado, fazendo com que as empresas busquem constantemente atender às demandas de seus clientes com o menor custo possível. Em paralelo, é inevitável o aumento da complexidade dos problemas enfrentados no cotidiano industrial, por diversos fatores, como a busca por maior flexibilização de produtos e serviços. A forma como as empresas lidam com esses problemas é um assunto de grande discussão.

Um problema de cadeia de suprimentos normalmente é complexo, podendo conter muitas variáveis, como tempo de entrega e quantidade de matéria prima a utilizar até o tempo de entrega do produto final no cliente específico. Para tanto, há atualmente no mercado inúmeras opções de softwares para sistemas operacionais que auxiliam a gerir a cadeia de suprimentos. Esses sistemas, chamados de ERP (Enterprise Resource Planning), conseguem gerir desde o sistema de compras de matérias primas, planejamento e programação de produção e até folha de pagamento de funcionários. Por serem sistemas robustos, a maioria deles acaba gerando muitos conflitos nos processos, reduzindo a flexibilidade das operações e exigindo muito dos programadores e responsáveis pelo banco de dados pela sua constante atualização. E as empresas acabam pagando fortunas por isso sem ter total proveito desse sistema. Essa migração em massa de grandes empresas para usos comerciais de ERP padrões, como o SAP, se deu em muitos casos sem, em paralelo, enriquecer o conhecimento holístico do sistema por parte dos recursos humanos. Ou seja, houve a aposta de que um sistema automático e ligeiramente customizado seria suficiente para gerir negócios cada vez mais complexos, sem que as pessoas que lidam com esses sistemas entendessem o que está por trás de tudo isso.

Como consequência desse processo as empresas enfrentam hoje diversas situações em que, pela falta de recursos com conhecimento holístico do sistema, acabam pagando preços exorbitantes com consultorias para resolver um problema que com grande probabilidade é intermitente. E quando se fala em conhecimento holístico não necessariamente é o conhecimento da ferramenta em questão, mas sim dos conceitos por

trás da cadeia de suprimentos, das teorias de restrições e de como funcionam sistemas de produção.

Uma realidade que pode ser encontrada no mercado brasileiro é a falta de investimento em recursos humanos, no conhecimento citado previamente, como forma de retenção de pessoas nas empresas. Essa prática se dá devido à grande chance de um profissional com esse nível de informação ser atraído por outra empresa e o (pouco) domínio da ferramenta que essa pessoa tinha evapora. Investimento em conhecimento e capacitação de profissionais é sabido que não é a curto prazo, porém é a solução mais sustentável.

Retomando do ponto de vista dos problemas complexos que estão cada vez mais presentes, a falta de profissionais habilitados a resolvê-los tem como consequências desde a precarização dos sistemas logísticos até a falta de investimento em tecnologia de ponta nas indústrias brasileiras. De posse desse conhecimento e com investimento em aplicá-lo ao mercado e à sociedade, alguns pontos como os seguintes poderiam ser muito melhor explorados:

- Modelagem de gargalos logísticos (ferrovias e rodovias);
- Logística reversa;
- Exploração dos bancos de dados para melhoria de processos (big data);

Diferentemente do Brasil, a busca por novas soluções de problemas complexos via modelagem matemática nos Estados Unidos é uma tendência crescente. Cargos executivos como CSO (Chief Scientist Office) são realidade em diversas empresas de tecnologia de ponta.

Dessa forma, o presente trabalho visa explorar a fronteira entre o meio industrial, fonte geradora de problemas, e a academia, fonte de ideias para resoluções de problemas. Essa exploração se dá através de uma interação com um exemplo de aplicação em que se busca a solução do mesmo de forma aplicável ao meio industrial, com fundamentos acadêmicos. Com uma abordagem mais prática, a resolução do estudo de caso proposto neste trabalho busca uma relação mais próxima com quem lida com problemas de alta complexidade como as tomadas de decisão do cotidiano corporativo, de forma a mostrar a visão sistêmica de solução de um problema de cadeia suprimentos. Finalizando, outro ponto importante a ressaltar é a questão do custo associado para se chegar à solução. Neste trabalho opta-se por solucionar o problema de modo a balancear o esforço humano

na modelagem matemática e computacional e a flexibilização do ponto ótimo, o que são alternativas viáveis quanto a custo e prazo de resolução para as corporações.

2. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar conceitos da gestão da cadeia de suprimentos sob uma ótica voltada para a indústria, através da solução de um exemplo prático proposto. A finalidade desse estudo é melhorar os entendimentos das dificuldades na elaboração de modelos de cadeia de suprimentos e na resolução dos mesmos, principalmente para a aplicabilidade em meio industrial.

A relevância desse estudo está não apenas na resolução e elaboração de novas ferramentas, mas sim ao ganho de conhecimento gerado durante o desenvolvimento do trabalho.

O exemplo de inspiração para o desenvolvimento do trabalho aborda um típico problema que envolve muitas variáveis em um sistema de produção, visando simular um exemplo em uma indústria química com compartilhamento de recursos em um processo batelada.

As duas abordagens de resolução são definidas como:

- Sistema baseado em heurísticas, onde todo o sistema depende de regras pré-estabelecidas para operar, desde a sequência de produtos até a quantidade a ser produzida;
- Modelagem matemática combinada com heurísticas (modelo híbrido), que utiliza conceitos de modelagem matemática para sistemas de programação e sequenciamento de produção, bem como heurísticas para facilitar e otimizar a solução do problema.

No fim, comparam-se as duas abordagens visando obter o melhor atendimento ao cliente no menor custo possível com o caso proposto e com duas simulações de distúrbios, com o intuito de verificar a robustez das abordagens propostas.

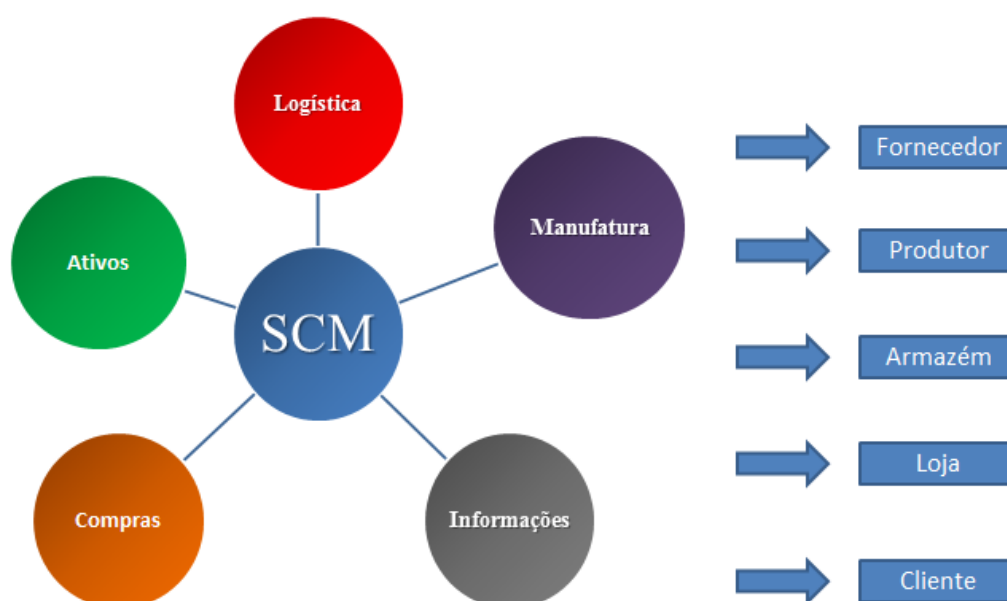
3. Revisão bibliográfica

Esse capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos relacionados à gestão da cadeia de suprimentos, como essa prática está relacionada com a indústria química, como é sua estrutura e quais são as características chaves para um desenvolvimento de um planejamento e sequenciamento de uma estrutura produtiva, bem como modelos matemáticos, heurísticos e híbridos para solução de problemas relacionados a cadeias de suprimentos.

3.1. Supply Chain

O Supply Chain Management, ou Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS), é definida por Tan (2001) como uma cadeia que integra cada processo de manufatura e fornecimento, desde as matérias primas até os produtos acabados, abrangendo diversas fronteiras organizacionais, englobando setores corporativos como logística, compras, manufatura, tecnologia da informação, entre outros. A Figura 3.1 mostra uma representação usual do conceito do GCS. Ballou (2006), por sua vez, define que o GCS representa o desenvolvimento e o aprimoramento de todas as atividades relacionadas com o fluxo e transformação de produtos e serviços associados, bem como os fluxos de informação relacionados e a geração de valor para todos os componentes da cadeia.

Figura 3.1: Esquematização do Supply Chain Management



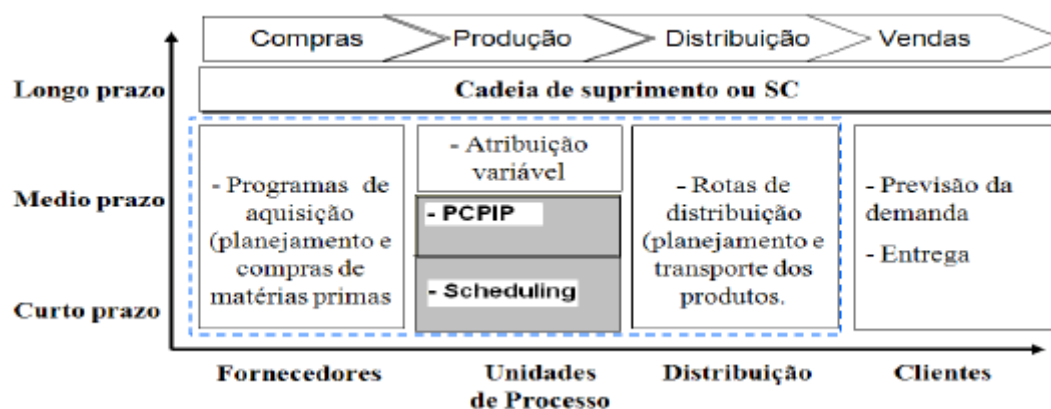
A grande importância de uma gestão funcional de toda uma cadeia de suprimentos permite extrair do sistema informações relevantes como pontos fortes e fracos, que visam auxiliar as tomadas de decisão que podem resultar em otimizações de custos e rendimentos, aumento de qualidade, o que proporciona maior competitividade do produto/serviço criando maior valor agregado e diferenciando-o da concorrência. (Shapiro, 2000).

A GCS pode ser definida como um conjunto de ferramentas de forma que integram todo um sistema a fim de torna-lo mais competitivo perante o mercado, encurtando distâncias e auxilia diretamente na tomada de decisões estratégicas nas organizações (Simchi-Levi et. al. 1999, Lasschuit e Thijssen, 2004). Já Hugos (2003) acrescenta que o GCS é a coordenação de toda a cadeia, desde a produção, inventário e distribuição, contando com a colaboração de todos os envolvidos, a fim de uma melhor qualidade no serviço.

Conforme Arnold (2011), para que uma empresa se mantenha competitiva no mercado, essa necessita organizar sua cadeia de fornecimento de forma a sempre otimizá-la, produzindo a quantidade certa na hora certa com o mais alto nível de qualidade e o menor custo possível. Isso mostra o quão crítico o GCS é para um negócio.

Em outras palavras, o GCS pode ser entendido como uma metodologia que visa à maximização do valor percebido pelo cliente, através da ruptura das barreiras entre áreas de uma mesma empresa e entre empresas (relações fornecedor-cliente). A Figura 3.2 representa de maneira bem sucinta a cadeia de suprimentos de um bem qualquer.

Para ter uma ideia dos benefícios potenciais do GCS, a Tabela 3.1 apresenta uma comparação entre o modelo tradicional de administração e o modelo de GCS. Nela é possível ver, por exemplo, a distinção entre a maximização da produção padronizada em massa, originada do modelo de gestão fordista, comparado com a capacidade de gerar produtos diferentes em uma velocidade muito maior nos tempos atuais, gerando produtos customizados em massa. Outros pontos importantes de ressaltar são a mudança no foco dos indicadores de performance - deixando de representar apenas custo e utilização e passando a enxergar informações da cadeia como atendimento ao cliente, qualidade e flexibilidade – e a maior abrangência e facilidade de se ter uma empresa global, com interfaces de comunicação que garantem agilidade nas tomadas de decisão.

Figura 3.2: Cadeia de suprimentos de um bem**Tabela 3.1: Comparativo entre modelo tradicional e modelo SCM para administração de materiais**

Item	Modelo Tradicional	Modelo SCM
Contexto histórico do aparecimento	Produção em massa	Customização em massa
Mercado competitivo	Gerenciamento local/regional	Geralmente global
Escopo e ação gerencial	Operativo e reativo	Estratégico e proativo
Parâmetro geralmente considerado nas decisões sobre fazer ou comprar	Custos de produção, utilização da capacidade e política de integração vertical.	Parâmetros de produção múltiplos (como custo, qualidade e flexibilidade), estratégia competitiva e desenvolvimento de novos negócios
Modelo competitivo baseado em	Unidade de negócios	Virtuais unidades de negócios

3.2. Indústria Química e Cadeia de Suprimentos

A engenharia química se relaciona fortemente com os sistemas de cadeia de suprimentos através da engenharia de sistemas, área que interliga conhecimentos comuns. No caso de indústrias químicas, a cadeia de suprimentos sofre influências desde o dimensionamento dos equipamentos ao tempo de vida dos produtos a serem utilizados. Por exemplo, se forem projetados reatores para misturar grandes bateladas por um longo período de tempo, exige-se por precaução um maior estoque do produto, gerando mais custo, bem como o uso de matérias primas com prazo de validade curto, fazendo com que a cadeia tenha maior velocidade em obter esses materiais para processá-los.

Um bom entendimento de sistemas cadeias de suprimentos é fundamental para profissionais da indústria química. Saber que há essa conexão entre quem fornece até quem compra o que se produz eleva o nível de criticidade em projetos e nas tomadas de decisão. É notável a criticidade que um projeto mal elaborado pode custar à companhia, elevando custos logísticos, retrabalhos e até mesmo a falta de abastecimento para seus clientes.

Na literatura há diversos trabalhos a respeito da interligação entre engenharia química, engenharia de processos e sistemas de cadeias de suprimento. O trabalho de Heisig et al. (2010) faz um levantamento de diversas abordagens acadêmicas e práticas do ponto de vista de projetos de engenharia visando a otimização dos resultados.

Rossi et al. (2015) trabalharam em um estudo de caso do grupo Linde na Itália, desenvolvendo um algoritmo genérico para otimização da cadeia de suprimentos para indústrias de gases. Os autores abordam a dificuldade de suprir 3 tipos de gases diferentes (nitrogênio, oxigênio e argônio) provenientes de três plantas no país, para 15 clientes diferentes. Para o modelo, foram utilizadas de equações de balanço de massa e energia nos compressores e refrigeradores, até equações com variáveis binárias para alocação de produtos em clientes.

Já Marchetti et al. (2016) estudaram alternativas para melhorias no planejamento e abastecimento de matérias-primas de uma planta de polipropileno com várias graduações de peso molecular, visando maximizar a produtividade e minimizar os custos de produção. Neste artigo, simulam um sistema de purificação da matéria prima através de uma coluna de destilação com a possibilidade de adquirir o material já puro de outra fonte, porém com um preço mais caro. Através de um plano anual de vendas, a solução que eles obtiveram pode gerar milhares de dólares de retorno financeiro.

Visando maximizar a produção energia limpa para a Dinamarca, Jensen et al. (2017) estudaram a cadeia de suprimentos da produção de biogás desde a fonte, matérias primas orgânicas como palha, beterraba e estrume, seu processamento em gás natural até a energia distribuída. O modelo desenvolvido pelos autores utiliza de balanços de energia para calcular o rendimento da geração de energia através de queima de gás e de balanços de massa para as restrições de capacidade dos equipamentos de conversão. O resultado obtido foi uma ferramenta capaz de auxiliar no planejamento de produção e nos projetos de novas plantas de forma a otimizar o custo de implantação.

Atualmente, muitas cadeias de suprimento típicas possuem unidades produtivas que estão distribuídas em diferentes países sendo capazes de atender às necessidades de diferentes mercados ao longo do mundo. Os principais impactos gerados com esse tipo de distribuição são o grande aumento do fluxo de material entre diferentes regiões do planeta e novos investimentos em diversos lugares do mundo (Papageorgiou, 2009).

A competitividade promovida por esse novo modelo global de negócios faz com que a manutenção de um serviço de alto nível ao mercado volte suas atenções também à questão da gestão de inventário. Existem muitos estudos que visam otimizar as condições tanto operacionais quanto da cadeia de suprimentos como um todo, a fim de reduzir os custos de inventário e de mão de obra (Chitale e Gupta, 2014). Shah (2005) cita duas necessidades imprescindíveis para que uma cadeia de suprimentos tenha performance competitiva: Design do mapa de valor e seus componentes e alocação efetiva dos recursos em cada estágio da cadeia. Segundo Grossman (2004), essa é uma área de grande atratividade, tanto para a indústria quanto para a academia, sendo um dos principais desafios o desenvolvimento de modelos para planejamento tático e estratégico que requerem soluções para problemas de otimização de larga escala, envolvendo uma gama enorme de variáveis.

Dessa forma, diferentes setores industriais que tem como característica a diferenciação e a produção de bens de alto valor agregado, como as indústrias de alimentos, cosméticos e farmacêuticos, possuem grande necessidade de que seus processos sejam de forma descontínua, em bateladas, compartilhando recursos produtivos e promovendo paradas para limpeza e setup entre produtos. Para que haja competitividade nesses setores industriais e melhor utilização dos recursos obtendo todas as vantagens de uma planta que produz em bateladas, ferramentas de planejamento são imprescindíveis.

É sabido que a demanda dos produtos interfere diretamente no modo de produção de uma planta em batelada, uma vez que quando há uma demanda constante e

previsível produz-se para repor os estoques. Porém, quando há incerteza nas demandas surge a necessidade de pequenas campanhas de produção para atendê-las. De forma a integrar mercado e ambiente produtivo, uma abordagem comum e frequentemente utilizada é a de hierarquizar o problema de produção, que separa o problema em duas partes. A primeira parte envolve o planejamento, onde há uma visão mais macroscópica, enxergando na cadeia a demanda, programando a compra das matérias primas e a quantidade de cada produto a ser feita por período. A segunda parte envolve o sequenciamento, também chamado de scheduling, que através de uma visão mais restrita de tempo, tem como objetivo alocar todas as quantidades de produto nos recursos e no tempo disponíveis.

3.3. Estrutura de uma Cadeia de Suprimentos

Uma cadeia de suprimentos, como já discutido previamente, visa contemplar o fluxo que agrega valor ao cliente, do fornecimento à entrega. Sua estrutura pode ser condensada de forma resumida em basicamente três elementos estritamente relacionados que são: os processos de negócio, atividades gerenciais e a estrutura da cadeia como um todo (Croxtton et. al. 2001).

Em resumo, os processos de negócio são as atividades pelas quais as companhias enxergam que ocorre a geração de valor para os clientes. As atividades gerenciais são as ferramentas de controle e estruturação para a criação de valor para os clientes bem como para a manutenção da saúde e desempenho da cadeia de suprimentos. Por último, a estrutura da cadeia tem como objetivo definir a configuração e comportamento das companhias dentro da integração esperada por parceiros de cadeia de suprimentos

Os processos da cadeia de suprimentos foram identificados por Croxtton et. al. (2001) em um número total de oito, sendo:

- 1) Gerenciamento do relacionamento com clientes: este é o processo que identifica e prioriza clientes chaves para que programas e diretrizes sejam estabelecidos a fim de maximizar a satisfação do cliente, através de atendimentos cada vez mais customizados;
- 2) Gerenciamento do serviço a clientes: é um processo que tem como principal função disponibilizar informações sobre pedidos, status de produção, previsão de entrega e distribuição do produto para os clientes;

- 3) Gerenciamento da demanda: É o processo responsável pelo estudo e entendimento da demanda, bem como sua previsibilidade, e que tem como principal objetivo maximizar a acuracidade da demanda planejada versus a real necessidade do mercado, independentemente de suas condições ou sazonalidades;
- 4) Atendimento a pedidos: processo que visa atender aos clientes solicitantes, tomando como base o tempo e a previsão de entrega;
- 5) Gerenciamento do fluxo de manufatura: processo que conta com o objetivo principal de concentrar-se em manufaturar produtos que estejam de acordo com as especificações e padrões de qualidade, otimizando a rotina de planejamento e programação de produção de forma a torna-la mais flexível;
- 6) Processos de compras: este processo tem como objetivo principal intensificar o relacionamento com fornecedores, estabelecer parcerias concretas em um ambiente negocial onde as relações tenham base transacional no ganha-ganha e, com isto, prover a manufatura de todos os recursos materiais necessários em um fluxo enxuto e racional.
- 7) Desenvolvimento de produtos e comercializações: inovação é tida como chave para muitos negócios continuarem sustentados ao longo de vários anos, uma vez que é notável a avidez do mercado por novos produtos, tecnologias e soluções. Velocidade nessa fase também é crucial.
- 8) Retorno: o gerenciamento de processos de retorno de produtos demonstra ser atualmente um diferencial competitivo das empresas, uma vez que muitos países vêm, ao longo dos anos, aperfeiçoando seus processos de logística reversa, quer seja por legislação ambiental ou por características dos produtos.

Conforme mencionado previamente no Capítulo 1, este trabalho não tem como foco todos os tópicos relacionados à cadeia de suprimentos, mas sim nos processos de gestão de manufatura, compreendendo o planejamento e controle da produção presentes no contexto industrial fabril, explicitados acima.

Com base no tópico 5, Stadtler e Kilger (2004) abordam temas relacionados a ferramentas e metodologias capazes de otimizar planejamentos de produção, como o APS (Advanced Planning System, tradução para Sistema de Planejamento Avançado). Ferramentas e algoritmos cada vez mais modernos estão sendo projetados com a intenção de prever com mais acuracidade demandas e planos de produção. Porém, planos não são

feitos para que durem por muitos anos da mesma forma. Sua validade fica restrita ao horizonte de tempo predefinida e quando atingida, surge a necessidade de se elaborar outro.

De acordo com o tamanho do horizonte de tempo os planos podem ser definidos em diferentes níveis, como mostrado a seguir também pela Figura 2.3 (Stadtler e Kilger (2004)):

- Planejamento de longo prazo: Chamadas de decisões estratégicas e tem a finalidade de desenvolver todo o sistema futuro para uma empresa. As principais atividades aqui relacionadas são a definição da capacidade produtiva, planos de novos produtos e uma estimativa de baixa precisão de como o mercado absorverá seus produtos. O intervalo de tempo para esse plano se dá normalmente entre 2 e 5 anos.
- Planejamento de médio prazo: Ainda dentro das decisões estratégicas, os planos de médio prazo, também chamados de planos táticos, têm maior impacto e conexão com o cotidiano fabril, sendo o responsável por determinar as quantidades de produto a serem entregues por períodos de tempo, de acordo com o formato da cadeia já estabelecido. Para esse plano, o horizonte de tempo comum está entre 6 e 24 meses.
- Plano de curto prazo: Também chamado de plano operacional está inteiramente interligado com o dia-a-dia da produção, especificando detalhadamente o que será executado e como será controlado. Nesse plano se decide qual a sequência de produtos e quanto de cada produto será produzido. Seu horizonte de tempo é entre uma semana e três meses.

Dessa forma, é possível ver que há uma relação entre os três tipos de plano, os quais os dois últimos estão mais diretamente relacionados com o escopo desse trabalho, envolvendo planejamento (tático) e sequenciamento (operacional) de produção.

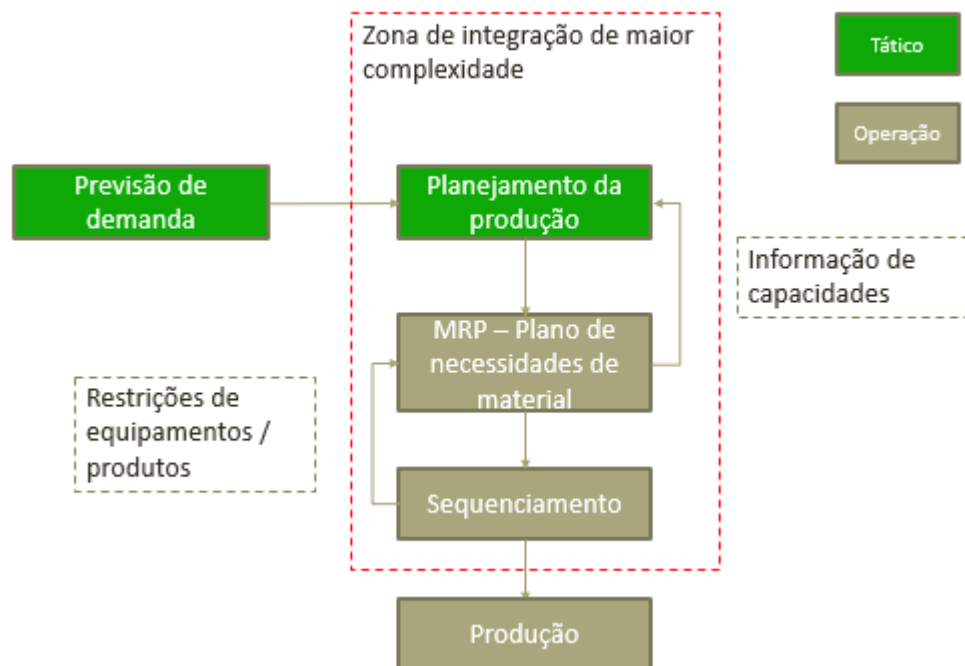
Dentro do planejamento e sequenciamento da produção se encontram variáveis de grande importância para a cadeia de suprimentos, como:

- Gestão das matérias primas: É necessário entender através do plano de demanda por produto como se comportam os consumos de matéria prima para que não falte, ou não se tenha um estoque alto ou até mesmo que se passe do prazo de validade.

- Receita e balanço de massa: Cada produto proveniente do plano de demanda necessita ter uma receita que precisa ser seguida rigorosamente (restrição dura). A receita e o balanço de massa auxiliam a gestão das matérias primas.
- Tempos de setup: Quando não se pode produzir mais de um produto em um equipamento ao mesmo tempo, para a troca entre produtos o tempo de setup acaba sendo uma variável acrescida no problema.

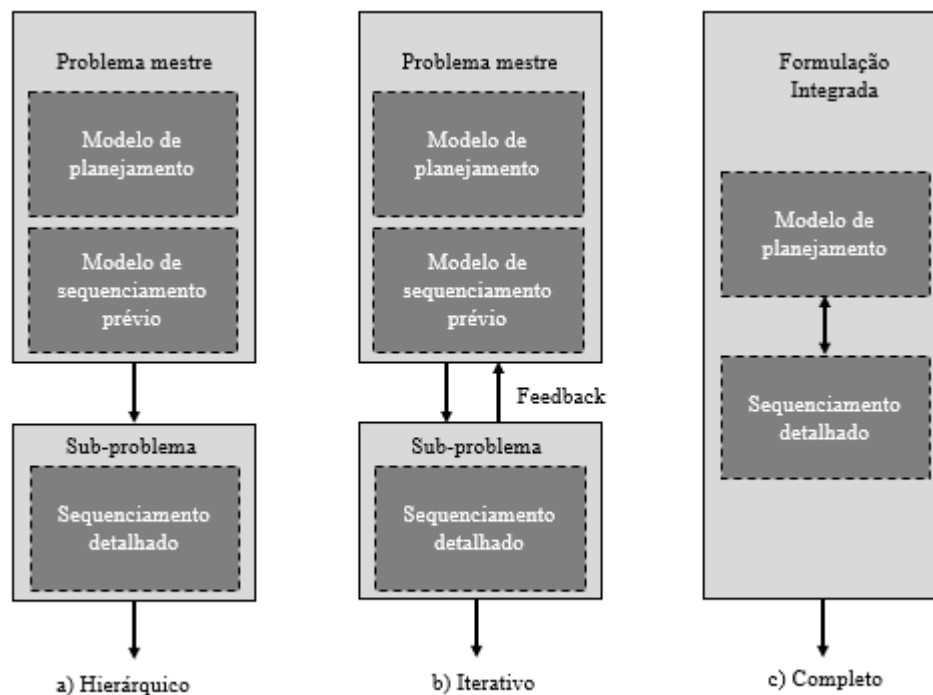
Se tratados de forma isolada, planejamento e sequenciamento podem ser resolvidos de forma independente utilizando os métodos que serão apresentados nas próximas seções, como programação matemática para o planejamento e uma simples heurística para o sequenciamento. Quando avaliados de forma separada ou podem oferecer um cenário macro que não contempla a realidade presente no cotidiano ou representa apenas uma solução de curto prazo. Seu valor real está na conexão entre as soluções do planejamento e sequenciamento, porém vários são os trabalhos na literatura (Shah e Ierapetritou, 2012; Grossmann, Van den Heever, e Harjunkski, 2002) que salientam a grande dificuldade que existe na interação entre esses dois ambientes, o de plano tático, de médio e longo prazo (planejamento), o qual determina a estrutura da cadeia de suprimentos e, assimilando objetivos de produção de cada produto e o operacional, de curto prazo (sequenciamento), que está relacionado com o período de tempo diário ou semanal das atribuições de atividades de cada unidade, conforme mostrado na Figura 3.3. Como forma de trabalhar essa relação de integração, Wu e Ierapetritou (2007) sugerem a possibilidade de criar uma relação de hierarquia, ou seja, sequenciamento dependente do planejamento ou vice-versa, bem como a opção da resolução do sistema por completo (abordagens monolíticas ou puramente matemáticas).

A necessidade dessa integração se dá pelo reconhecimento de que customização e diversificação da produção são imprescindíveis aos negócios, tornando plantas e processos em multi-produtos e, por consequência, seus processos ainda mais complexos. Ao mesmo tempo, o mercado exige da indústria que a demanda seja atendida, portanto as atividades de planejamento e sequenciamento se tornam ainda mais cruciais para os negócios (Maravelias e Sung, 2009).

Figura 3.3: Planos táticos e operacionais

Maravelias e Sung (2009) descrevem ainda que há três grandes grupos de resolução para o problema integrado, conforme visto na Figura 3.4. Há dois grupos comuns, que utilizam de conceitos de hierarquização entre dois subproblemas, o problema mestre, de mais alto nível e menor detalhamento, e o subproblema, relacionado com o sequenciamento já detalhado. Os objetivos de produção nos problemas mestres são dados de entrada para o sequenciamento detalhado. Quando o fluxo é de mão única, o método é do tipo hierárquico (a), porém quando há retroalimentação entre os subproblemas chama-se hierárquico iterativo (b). Se a formulação integrada contiver modelos detalhados de sequenciamento para cada período do planejamento, então a solução já fornece toda a informação necessária. Este é o grupo chamado de resolução completa (c), porém são de extrema dificuldade de resolução e requerem métodos avançados de solução.

Figura 3.4: Estratégias de solução do problema integrado de planejamento e sequenciamento.



Fonte: Maravelias e Sung (2009).

Sabendo das dificuldades de resolver problemas dessa natureza, abaixo estão listadas algumas características principais que inviabilizam o uso de abordagens clássicas na resolução desses problemas:

- Excesso de variáveis e restrições;
- Relação de integração planejamento e sequenciamento;
- Abordagem do tempo, se discreto ou contínuo;

Se o tempo for discreto, a relação entre o fim e o início dos períodos de tempo para os produtos;

- Necessidade de resolução rápida;
- Necessidade de uma solução aceitável;

3.4. Abordagens para Solução de Problemas de Cadeia de Suprimentos

Nessa seção serão discutidas as principais bases teóricas utilizadas como referência para esse trabalho. O conteúdo diz respeito à métodos e abordagens de resolução para o tipo de problema já mencionado no capítulo da introdução, ou seja, problemas de planejamento e sequenciamento de produção, passando por modelagem matemática até técnicas heurísticas de solução de problemas.

Os problemas de otimização, principalmente envolvendo variáveis de decisão, possuem grande dificuldade de resolução, seja pela complexidade das restrições ou pela quantidade de variáveis de decisão. O tempo para obter uma resposta ótima desses sistemas é a chave para muitos negócios tomarem suas decisões no momento certo e maximizar resultados.

Tradicionalmente, problemas típicos de planejamento e sequenciamento de produção lidam diretamente com duas questões principais, a alocação de recursos (tamanho de lotes, distribuição de fluxos, tempo de batelada) e solução temporal, ou seja, como representar o tempo na modelagem do problema.

É necessário então que o problema de planejamento e sequenciamento de produção seja modelado de forma a considerar estas relações de alocação de lotes e distribuição de tempo existentes entre as diversas operações que compõem o processo produtivo. Uma vez representada a estrutura de processamento e de posse de dados relevantes ao problema, como quantidade a ser produzida, prazos de entrega e critérios de otimização, o problema pode ser resolvido através de diversas abordagens, como programação matemática, busca em árvore ou uma heurística de solução.

Para a definição da estrutura de um problema de planejamento e sequenciamento, esta seção apresentará um modelo de quantificação de tamanhos de lotes, o Lot Sizing (Definição de tamanho de lotes) e discutirá sua aplicação. Para a questão da representação do tempo, será tratado a dificuldade na sua modelagem e apresentado uma abordagem para lidar com o tempo, através do Horizonte Rolante.

Esta seção também visa apresentar diversas abordagens para a resolução do problema, como os modelos de otimização via programação matemática, um método de busca em árvore muito popular, Branch and Bound, e Heurísticas.

3.4.1. Dimensionamento de lotes – Lot sizing

O problema comum em dimensionamento de lotes basicamente consiste em um problema de programação linear que tem como objetivo definir a quantidade de um item a ser produzido, sob uma determinada demanda em um horizonte de tempo finito, sem limitações de capacidade e tempos de set up, visando a minimização do uso de recursos, dos custos de produção e do estoque dos itens (matéria prima e produto acabado). Quanto mais itens considerados no plano de produção, restrições de capacidade e custos de preparação também são incluídos, mais aumenta a complexidade desse problema. Quando consideramos o processo de preparação da máquina, o problema passa a ser formulado como um problema de programação linear inteiro-misto, pois passa a apresentar variáveis binárias associadas à preparação ou não das máquinas (Karimi et. al. 2003).

Algumas características influenciam diretamente na classificação, modelagem e na complexidade do problema, como por exemplo:

- O tipo de horizonte de planejamento, finito ou infinito, contínuo ou discreto e rolante. Ou seja, a forma como se lida com o tempo pode ser um fator que agregará ainda mais complexidade na resolução do problema;
- A quantidade de itens consideradas na fabricação;
- Restrições e limitações de capacidade, recursos, equipamentos;
- Tipos de demanda, constante, cíclica, sazonal, etc...
- Política de estoque de produtos e matérias primas, entre outros

Um exemplo de modelo matemático aplicado a esta abordagem é o apresentado por Wagner e Within (1958), que tem como objetivo determinar a produção de diferentes produtos em uma escala de tempo, satisfazendo suas demandas e minimizando custos de operação. Para esse modelo, tem-se os seguintes parâmetros:

Índices

$t = 1, \dots, T$ – Tamanho do horizonte de tempo

$i = 1, \dots, N$ – Quantidade de itens

Parâmetros

S_{it} : custo de preparação (setup) para a produção do item i no período t ;

H_{it} : custo unitário de estocagem do item i no período t ;

D_{it} : demanda do item i no período t ;

D_{itr} : soma das demandas do item i do período t até o período r .

Variáveis:

X_{it} : quantidade do item i produzida no período t ;

W_{it} : quantidade do item i estocada no período t ;

Z_{it} : variável binária que indica se a máquina está preparada para a produção do item i no período t .

$$\text{Minimizar} \quad \sum_i^N \sum_t^T H_{it} W_{it} + \sum_i^N \sum_t^T Z_{it} S_{it} \quad (3.1)$$

s. a.

$$X_{i1} - W_{i1} = D_{i1} \quad (3.2)$$

$$W_{i,t-1} + X_{it} = D_{it} \quad (3.3)$$

$$X_{it} - D_{it} Z_{it} \leq 0 \quad (3.4)$$

$$Z_{it} \in \{0,1\} \quad (3.5)$$

$$X_{it}, W_{it} \in \mathbb{R} \quad (3.6)$$

A função objetivo visa minimizar os custos de estocagem e de preparação. As restrições (3.2) e (3.3) são para equilíbrio de estoque, garantindo que a demanda seja sempre satisfeita, ou seja, para cada item, no primeiro período, a quantidade produzida menos a quantidade que será estocada deve ser igual a demanda e, nos demais períodos, para cada item, a quantidade de itens em estoque mais a quantidade produzida menos a quantidade de itens que será estocada deve ser igual a demanda daquele tipo de item, em cada um dos períodos. O estoque inicial é considerado nulo. As restrições (3.4) e (3.5) asseguram que haverá produção apenas quando houver setup de máquina. Assim, quando $X_{it} > 0$, $Z_{it} = 1$. Caso contrário, se $X_{it} = 0$, a otimalidade faz com que $Z_{it} = 0$. Por fim, a restrição (3.6) é de não negatividade das variáveis.

3.4.2. A Representação do Tempo e Horizonte Rolante

Normalmente em problemas de cadeia de suprimentos, o horizonte de tempo disponível é dividido em um número de intervalos de igual duração, chamados *slots*. O tamanho de um *slot* é igual ao máximo divisor comum de todos os tempos de processamento das operações. É de grande vantagem o fato de se ter delimitado cada *slot* para todos os produtos e operações. Eventos de qualquer tipo (início ou fim de processamento, ocupação de um equipamento, etc.) são permitidos apenas nos extremos desses *slots*. A desvantagem é que tornar o tempo discreto deve ser suficientemente detalhado para representar todos os eventos de interesse, o que pode resultar em um número extremamente grande de variáveis binárias, o que pode dificultar ainda mais a resolução do problema.

Outras formulações usam uma representação contínua do tempo, de forma a reduzir a dimensão do problema. O horizonte de tempo é dividido em intervalos de duração variável, chamados eventos. As durações desses eventos são variáveis do problema. As operações são associadas a um evento, ao invés de definidas em relação ao tempo.

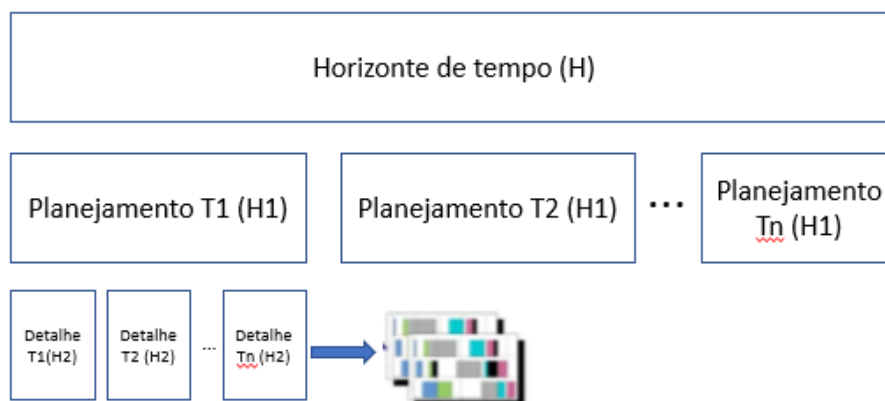
Há uma técnica que permite adaptar o modelo matemático a mudanças dos parâmetros de entrada, considerando o tempo como blocos discretos e de mesmo tamanho. Esta técnica, chamada de horizonte rolante, consiste em dividir o horizonte de planejamento em duas extensões. O método de horizonte rolante é aplicado para problemas de sequenciamento de longo e médio prazo. Para essa classe de problemas, um sistema de decomposição baseado em um horizonte rolante é utilizado e normalmente dois subproblemas são resolvidos. Em um nível mais macro, uma variante do modelo é utilizada para encontrar a quantidade ótima dos produtos e a extensão do horizonte de tempo a ser considerada para resolução do problema de sequenciamento em um cenário mais detalhado. No cenário de maior detalhamento e curto prazo, o sequenciamento acontece e retroalimenta o cenário macro, dando continuidade na resolução do problema. (Wu and Ierapetritou, 2003; Shaik et al., 2009).

Métodos de horizonte rolante são largamente utilizados na resolução do problema de otimização de planejamento e sequenciamento integrados, se baseando em uma sequência de iterações. Em princípio, essa abordagem resulta em soluções de planejamento e sequenciamento viáveis com uma redução significativa de esforço

computacional. Geralmente a representação do tempo na forma discreta é utilizada para o domínio do tempo de planejamento.

Uma representação desse sistema pode ser descrita pela Figura 3.5. Considerando um horizonte de tempo H , pode-se dividir esse horizonte em infinitos sub grupos, os quais serão as representações dos planejamentos por períodos menores, chamados de $H1$. Para cada período de planejamento, são produzidos então infinitos períodos ainda menores onde é possível obter um maior nível de detalhamento da alocação de produtos para o sequenciamento da produção, de período $H2$. Como resultado, o sequenciamento detalhado é gerado, alimentando os novos períodos de planejamento, até que todo o período H seja contemplado. Traduzindo para a realidade de utilização desse método, H , que costuma estar como período de planejamento estratégico, pode ser considerado como de 2 a 5 anos. Já $H1$, referente ao período de planejamento da produção possui uma amplitude de 6 meses a 1 ano. Quanto ao detalhamento ou sequenciamento, pode estar compreendido entre 1 semana e um mês, como valores comuns para $H2$.

Figura 3.5. Esquematisação do horizonte rolante.



3.4.3. Otimização Matemática

De acordo com Papageorgiou (2009), a modelagem matemática voltada à otimização é uma das metodologias mais utilizadas na atualidade voltada para otimização de sistemas de cadeia de suprimentos industriais.

A modelagem matemática consiste em basicamente transcrever um fenômeno, um evento ou até mesmo um sistema, com a finalidade de se poder prever seu comportamento. Dessa forma, equacionando sistemas e entendendo suas restrições e

limitações é possível encontrar soluções ótimas. A otimização se preocupa em encontrar a melhor dentre as possíveis através de métodos quantitativos eficientes. Uma enorme variedade de problemas nas áreas de projeto, construção, cadeia de suprimentos, produção, podem ser resolvidos através de otimização. (Edgar et al., 2001).

Os tipos de problemas de otimização que serão apresentados a seguir baseiam-se praticamente nas Equações de 3.7 a 3.11 mostradas abaixo.

$$\min_{x,y} f(x,y) \quad (3.7)$$

$$s. a. \quad h(x,y) = 0 \quad (3.8)$$

$$g(x,y) \leq 0 \quad (3.9)$$

$$x \in X, \forall X \subseteq \mathbb{R} \quad (3.10)$$

$$y \in Y, \forall Y \text{ inteiro} \quad (3.11)$$

No modelo acima, x é um vetor de variáveis contínuas e pertencente aos números reais, y é um vetor de variáveis pertencente aos números inteiros, $h(x,y) = 0$ correspondem às equações de restrição, $g(x,y) \leq 0$ correspondem às inequações de restrição e $f(x,y)$ representa a função objetivo. A Equação 3.7 representa inúmeros casos de problemas de otimização, dependendo de como seus elementos acima citados são representados. Por exemplo, se não há variáveis inteiras e a função objetivo e as restrições são funções lineares (polinômios de grau 1), o problema é considerado como programação linear. Se não há variáveis inteiras e a função objetivo e/ou as restrições apresentam termos não lineares (exponenciais, polinômios de grau maior que 1, etc...), o problema é considerado como programação não-linear. Já se há variáveis inteiras, em para cada uma das duas situações anteriores, considera-se então o problema como programação mista inteira linear ou não linear.

Dessa forma, assume-se que seja possível descrever matematicamente qualquer problema. O que pode inviabilizar a solução do problema ou até mesmo tornar a modelagem mais complexa são as hipóteses e restrições atreladas ao mesmo, são elas quem limitam o que é possível modelar.

3.4.3.1. Programação Linear

Um problema de otimização é determinado como linear quando tanto sua função objetivo quanto suas equações de restrição são constituídas por polinômios de grau 1, ou

seja, funções lineares. Por apresentar grande esforço de cálculo, os problemas de programação linear só começaram a se desenvolver com o advento da computação, por volta da década de 1940. Um método chamado Simplex foi desenvolvido por Dantzig em 1947 com a finalidade de resolver todo tipo de problema linear, com um número muito grande de variáveis e equações, sendo viável até 100000 variáveis (Rao, 2009).

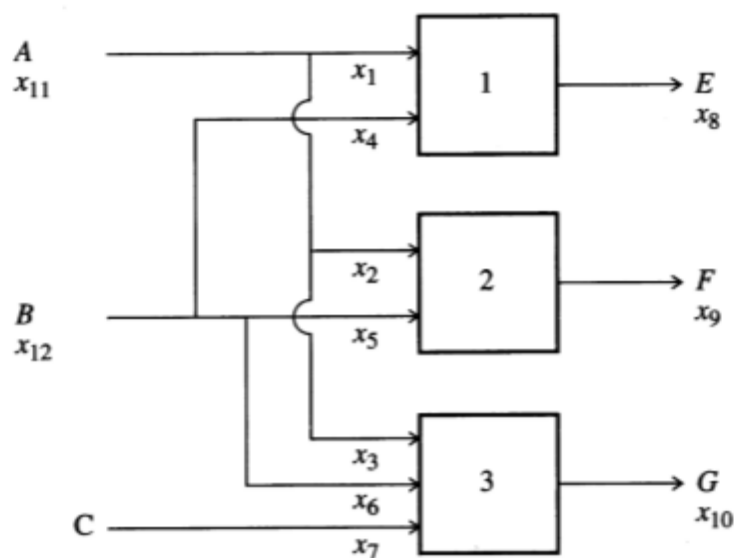
São exemplos de problemas relacionados à programação linear:

- 1) Balanceamento da força de trabalho operacional;
- 2) Selecionar produtos para fabricação em um período próximo, tirando o máximo proveito dos custos de recursos e preço de venda, para maximizar o lucro;
- 3) Encontrar padrões de distribuições entre locais de armazenagem para redução de custos de transporte e estocagem;

Edgar et al (2001) citam um exemplo de aplicação de programação linear, que é mostrado a seguir.

O exemplo proposto lida com um problema simplificado de alocação de fluxo de material em um processo multiproduto, cujo fluxograma se encontra na Figura 3.6, em que se tem como objetivo maximizar os lucros. Esse é um caso típico de modelo de balanço material linear.

Figura 3.6 :Diagrama de fluxo de uma planta multi-produto



Fonte: Edgar et al. (2001)

Conforme visto na Figura 3.6 e com os dados das Tabelas 3.2 e 3.3, a função objetivo precisa ser estabelecida para determinar o maior lucro possível por dia.

Tabela 3.2: Dados de processo do problema

Processo	Produto	Estequiometria (kg	Custo	Preço de venda (\$/kg)
		produto/ kg reagente)	operacional (\$/kg)	
1	E	$2/3 A + 1/3 B$	1.5	4.0
2	F	$2/3 A + 1/3 B$	0.5	3.3
3	G	$1/2 A + 1/6 B + 1/3 C$	1.0	3.8

Tabela 3.3: Informações de matérias primas do problema

Matéria prima	Capacidade máxima (kg/dia)	Custo (\$/kg)
A	40000	1.5
B	30000	2.0
C	25000	2.5

A função objetivo $f(x)$ para esse problema seria a diferença entre o preço total de venda e o custo total, sendo este a soma do custo operacional por produto vendido somado ao custo da matéria prima. Sendo assim:

$$f(x)(4 - 1,5)E + (3.3 - 0.5)F + (3.8 - 1)G - 1.5A - 2B - 2.5C$$

Substituindo os termos da equação acima pelas variáveis correspondentes aos fluxos, tem-se a seguinte função objetivo:

$$f(x)2.5x_8 + 2.8x_9 + 2.8x_{10} - 1.5x_{11} - 2x_{12} - 2.5x_7$$

As seis variáveis da função objetivo obedecem às restrições a seguir derivadas do balanço material e das restrições de capacidade.

$$\begin{aligned}x_{11} &= 0.667x_8 + 0.667x_9 + 0.5x_{10} \\x_{12} &= 0.333x_8 + 0.333x_9 + 0.167x_{10} \\x_7 &= 0.333x_{10} \\0 &\leq x_{11} \leq 40000 \\0 &\leq x_{12} \leq 30000 \\0 &\leq x_7 \leq 25000\end{aligned}$$

Dessa forma, tem-se então a função objetivo do problema bem como suas variáveis e restrições.

Há atualmente diversas formas de se solucionar um problema como esse, desde as mais manuais, como o Simplex, até softwares que resolvem problemas enormes em questões de centésimos de segundos, como o Solver da Microsoft Excel, o CPLEX e o MatLab.

Para resolução desse problema foi utilizado o Solver do Excel, obtendo as seguintes respostas presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Resultado da otimização do problema

X₇ (kg/dia)	25000
X₈ (kg/dia)	0
X₉ (kg/dia)	3750
X₁₀ (kg/dia)	75000
X₁₁ (kg/dia)	40000
X₁₂ (kg/dia)	13750
f(x) (\$/dia)	70500

Analisando os resultados obtidos na Tabela 3.4, é possível observar que a maximização do lucro diário fez com que uma das linhas de produto fosse posta de lado perante as demais. Uma vez que no sistema modelado não há nenhuma restrição à quantidade de cada produto a ser entregue diariamente, a resposta apresentada é totalmente factível.

3.4.3.2. Programação Não-Linear

Conforme dito anteriormente, o problema de otimização tratado como programação não-linear apresenta pelo menos um termo nas equações, inequações ou função objetivo sendo não linear. Dependendo de como o problema se apresenta, pode ser resolvido de forma algébrica (via máximo ou mínimo local pela primeira derivada da função objetivo).

São exemplos de problemas relacionados à programação não-linear:

- 1) Problemas de equacionamento de equilíbrio químico;
- 2) Projetos de trocadores de calor;
- 3) Estudo de custo para dimensionamento de tubulações;

3.4.3.3. Programação Mista Inteira Linear e Não-Linear

Muitos problemas em projetos, logística, operacionais e programação/scheduling de produção possuem variáveis que não são contínuas, são valores inteiros ou binários. Os valores binários, por exemplo, são utilizados para representar numericamente dicotomias de tomadas de decisão, como se um produto está em produção ou não ou se um equipamento será instalado ou não. Vários exemplos na literatura são apresentados para demonstrar o quão amplo e cotidiano é esse tipo de problema, como o problema do caixeiro viajante (“The traveling salesman problem”) (Edgar et al., 2001). Se o problema contém apenas equações e inequações com funções lineares, ele é considerado Programação Mista Inteira Linear. Porém, se alguma das inequações ou equações possuir algum termo não linear o problema é considerado como Programação Mista Inteira Não-Linear. Esse tipo de problema possui muita interação com a área de estudos de Pesquisa Operacional, focada em alocação de recursos, projetos de novas instalações e planejamento e sequenciamento de produção.

São exemplos de problemas relacionados à programação mista inteira:

- 1) Planejamento e sequenciamento de produção para planta multi-produtos;
- 2) Projeto de rede de trocadores de calor;
- 3) Sequenciamento de colunas de destilação;

Uma das principais características dos problemas de programação mista é relacionada à dificuldade de resolução. Uma vez que muitos dos problemas possuem o termo inteiro como variável de decisão, as soluções tornam-se problemas de análise combinatória. Cada escolha ou decisão da variável inteira leva a um problema linear ou não linear que precisa ser resolvido para a melhor solução. Dessa forma, uma maneira de se encontrar a solução ótima seria explorando todas as combinações possíveis e escolher a melhor entre todas. Porém essa é uma estratégia extremamente exaustiva, uma vez que o número de problemas é de natureza exponencial em relação à quantidade de variáveis inteiras. Por exemplo, se um problema possui 20 variáveis binárias de decisão, seriam ao todo 2^{20} problemas a serem resolvidos.

Tendo em vista a quantidade de problemas a serem resolvidos, diferentes modelos e abordagens foram desenvolvidos para auxiliar a encontrar a melhor solução de forma mais eficiente. A seguir encontram-se dois dos algoritmos mais comuns para resoluções de problemas mistos. O primeiro método será abordado de forma mais aprofundado nas próximas seções:

- 1) Branch and Bound: O método cria uma árvore binária, cujas variáveis de tomadas de decisão criam novos ramos (branch), chamados nós, e para cada nó um novo problema de otimização (linear ou não) precisa ser resolvido.
- 2) Cutting Plane: Basicamente nesse método, ao invés de criar novos subproblemas a cada tomada de decisão como no branch and bound, novas restrições, chamadas Cuts, criam regiões de soluções possíveis cada vez mais restritas, até que se encontre a solução ótima.

Conforme dito em seções anteriores e nas aplicações dos tipos de otimização matemática, é possível ver uma forte relação com os problemas de cadeia de suprimentos, como planejamento e sequenciamento de produção, e planejamento estratégico de companhias inteiras que podem usufruir da otimização matemática.

O exemplo de aplicação de programação mista vem de Edgar et al. (2001), que trata de uma planta multi-produto com equipamentos compartilhados para produção.

Neste caso, são 4 produtos a serem produzidos (p1, p2, p3 e p4) que precisam passar por 3 reatores batelada em série. O tempo em horas de processamento de cada produto em cada reator é dado na Tabela 3.5 abaixo. Assume-se que não há estoque intermediário entre os reatores e que obrigatoriamente ao terminar o processamento em

um reator o produto deve seguir para o próximo até ser finalizado no reator 3. Não podem ser processados dois produtos ao mesmo tempo.

Tabela 3.5: Tempo de processamento de cada produto em cada reator

	Reator 1	Reator 2	Reator 3
P1	3.5	4.3	8.7
P2	4	5.5	3.5
P3	3.5	7.5	6
P4	12	3.5	8

Com base nessas informações, deve-se calcular qual a melhor sequência entre os 4 produtos de forma a minimizar o tempo total de fabricação dos quatro produtos.

Nesse caso, como são apenas quatro produtos envolvidos, uma abordagem de tentativa e erro até encontrar dentro de todas as possibilidades o melhor resultado, pode ser viável através de programação em linguagens como Visual Basic ou FORTRAN. Por análise combinatória, tem-se $4! = 24$ possibilidades de resultado. Porém, se fossem 10 produtos já seriam mais de 3 milhões de possibilidades.

Para esse problema tipo de problema, desenvolve-se então a modelagem do sistema, chamando N do número total de produtos e M a quantidade de unidades de processamento. Neste caso, $N=4$ e $M=3$. Cria-se então a matriz $C_{i,k}$, a qual se refere ao tempo de processamento do produto i na unidade k , sendo que i pertence a N e k pertence a M . A matriz $T_{i,k}$ se refere à Tabela 3.6 acima. Juntas, as matrizes $C_{i,k}$ e $T_{i,k}$ formam as restrições de alocação de produtos nas unidades de processamento. Juntamente a essas duas matrizes, tem-se a matriz $X_{j,i}$, onde j indica a posição sequencial do produto i a ser processada, sendo uma matriz binária. Dessa forma, as equações do sistema e a função objetivo são:

Minimizar $C_{3,4}$.

$$\begin{aligned}
 C_{j,k} &\geq C_{j,k-1} + \sum_i^N X_{i,j} T_{j,k} \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \\
 C_{j,1} &\geq C_{j-1,1} + \sum_i^N X_{i,j} T_{j,1} \quad i = 1, \dots, N; \\
 C_{j,k} &\geq C_{j-1,k+1} \quad j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \\
 \sum_i^N X_{i,j} &= 1 \\
 \sum_j^N X_{i,j} &= 1
 \end{aligned}$$

A primeira inequação diz respeito à limitação de que para um produto j sair de um reator $k-1$ para o reator k , o tempo para entrar no próximo reator tem que ser maior que o anterior somado ao tempo de processamento. A segunda inequação se refere à restrição de que só se processa um produto por vez, sendo que para aquele reator, o próximo produto a entrar precisa esperar o anterior sair. A terceira inequação relaciona a transição de um produto para outro reator e diz que o produto seguinte precisa esperar o anterior sair da próxima máquina em que ele entrará. A quarta e quinta equações se referem às condições de existência da matriz de ordenação dos produtos.

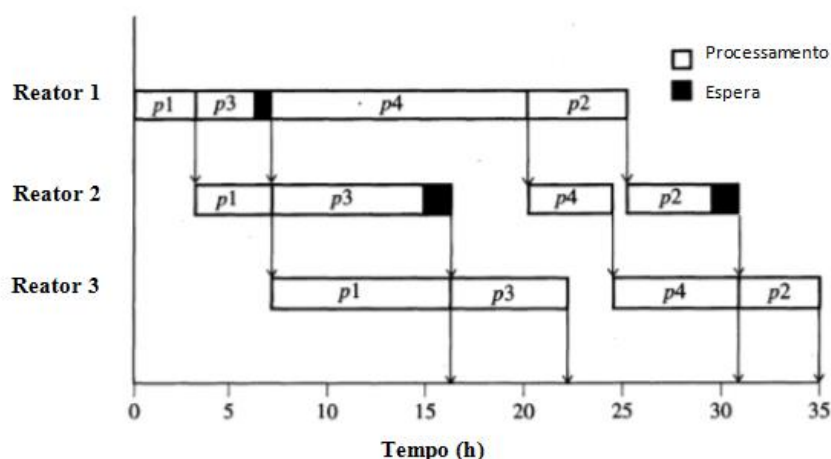
Esse problema pode ser resolvido tanto com uma programação em um software como o GAMS quanto no Solver do Excel. O resultado obtido é a matriz $X_{i,j}$, que mostra o sequenciamento dos produtos de forma a minimizar o último resultado da matriz $C_{j,k}$.

O resultado obtido foi a sequência: P1, P3, P4 e P2. Nessa disposição, o tempo total de processamento dos quatro produtos ficou em 34,8 horas, conforme o gráfico de Gantt mostrado na Figura 3.7.

Apesar de simples, por todas as ferramentas e modelos já desenvolvidos que facilitam sua resolução, este exemplo mostra a dificuldade em se retratar de forma matemática as variáveis inteiras e os intervalos de tempo. É possível ver a complexidade em descrever matematicamente que apenas um produto por vez deve ser processado em cada reator e que para começar a próxima etapa no reator seguinte, o estado de tempo precisa ser maior que o anterior somado ao seu tempo de processamento. Outra característica interessante é a forma como as inequações aparecem para tentar retratar o que ocorre em cada intervalo de tempo. Por ser um item que confere grande complexidade

e alta probabilidade de estar em um problema de cadeia de suprimentos, na próxima seção será discutida uma abordagem para lidar com o tempo.

Figura 3.7: Representação gráfica da solução do sistema.



Fonte Edgar et. al (2001)

A resolução e modelagem de um problema clássico de otimização não é fácil por si só. No meio industrial, sua modelagem fica comprometida, devido falta de acuracidade na descrição das equações de restrição e objetivo. Outro fator que pode ser impeditivo para seu uso é o tempo para uma resposta viável, uma vez que no setor produtivo uma resposta tem que vir, sendo ela a ótima ou não, mas tendo que ser viável financeiramente e em tempo hábil.

3.4.4. Métodos de Busca em Árvore e Branch and Bound

Conforme dito na seção anterior, problemas de alocação de produtos em slots de tempo tem como base uma natureza combinatorial, sendo inviável a solução exaustiva, ou seja, explorar todas as soluções possíveis quando se tem um numero de variáveis muito extenso. As abordagens de busca em árvore realizam uma busca parcial e controlada de possíveis soluções do problema, podendo utilizar de algoritmos customizados para cada caso. Uma das abordagens mais comuns de busca em árvore é o Branch and Bound.

O método Branch and Bound, inicialmente desenvolvido por Land e Doig (1960), foi desenhado para resolver problemas de natureza inteira e linear. Porém, dada a sua praticidade, o método foi estendido para problemas inteiros e não-lineares também.

A forma mais simples de se resolver um problema envolvendo variáveis inteiras, porém não menos custosa, envolve a enumeração de todos os pontos inteiros, descartando os que não são viáveis e avaliando a função objetivo de acordo com as combinações das demais variáveis até que se encontre a melhor solução. Embora simples, em alguns casos, conforme mencionado acima, pode apresentar uma quantidade de combinações que tornaria o tempo de solução muito elevado. O Branch and Bound pode ser considerado como uma enumeração refinada, em que há uma seleção dos números inteiros que tendem a não obter resultados promissores e são assim descartados sem a resolução completa desses. No método Branch and Bound, o problema inteiro não é resolvido diretamente. Em vez disso, o método primeiro resolve um problema contínuo obtido por relaxamento das restrições de número inteiro sobre as variáveis. Se a solução do problema contínuo for uma solução inteira, ela representa a solução ótima do problema inteiro.

O exemplo a seguir ilustra de forma simplificada como funciona a solução do problema (Edgar et al., 2001). De acordo com o sistema a seguir:

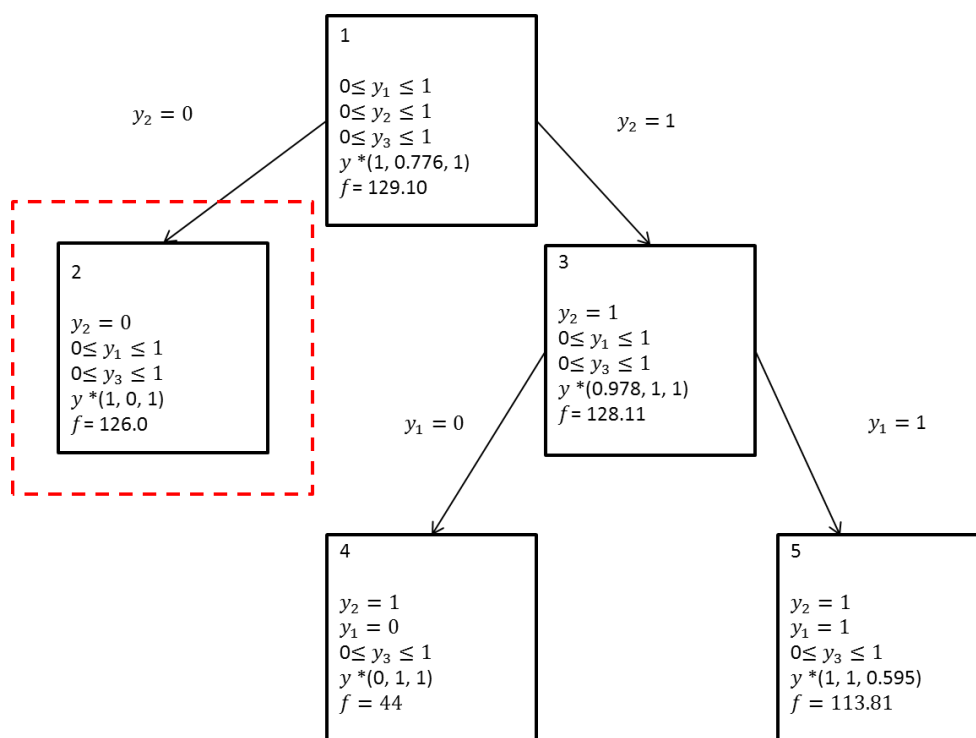
$$\begin{aligned} \max \quad & f = 86y_1 + 4y_2 + 40y_3 \\ \text{s.t.} \quad & 774y_1 + 76y_2 + 42y_3 \leq 875 \\ & 67y_1 + 27y_2 + 53y_3 \leq 875 \\ & y_1, y_2, y_3 = 0, 1 \end{aligned}$$

Neste exemplo, todas as variáveis inteiras são binárias. Quando um problema é formado atendendo a restrição "0 ou 1" para "qualquer lugar entre 0 e 1", quando deveria ser 0 ou 1, é chamado de relaxamento. O método começa resolvendo esse relaxamento e se todas as variáveis discretas tiverem valores inteiros, esta solução resolve o problema misto inteiro e linear. Se não, uma ou mais variáveis discretas tem um valor fracionário. Assim, o método exige uma escolha de uma dessas variáveis em sua ramificação e, em seguida, cria dois novos subproblemas de natureza linear fixando esta variável primeiro em 0, em seguida, em 1. Se qualquer um destes subproblemas tem uma solução inteira, não é necessário investigar mais. Se seu valor objetivo é melhor do que o melhor valor encontrado até agora, ele substitui esse melhor valor. Se qualquer subproblema é inviável, não é necessário investigar mais. Caso contrário, encontramos outra variável fracionária

e repita as etapas. Um teste inteligente delimitador também pode ser aplicado a cada subproblema. Se o teste for satisfeito, o subproblema não precisa ser investigado mais.

Na Figura 3.8 cada nó representado por um número no canto superior esquerdo representa um subproblema de natureza linear.

Figura 3.8: Exemplo de aplicação do método Branch and Bound



O nó 1 representa o primeiro passo da solução do problema, resolvendo como programação linear um sistema de programação puramente inteira de forma relaxada. Dessa forma, é possível observar que uma das três variáveis (y_2) possui dentro do conjunto da solução ótima um valor não inteiro, obtendo para a função objetivo o valor de 129.1. Portanto, uma vez que a variável não atende a restrição de ser um número inteiro igual a 0 ou 1, dois novos problemas que serão resolvidos de forma relaxada são criados, os nós 2 e 3, fazendo com que a variável y_2 assuma os valores 0 e 1, respectivamente. Esse processo de criação de novos subproblemas é chamado de branching (ramificação). As regiões viáveis de cada subproblema são partes da região viável do problema original e podem ou não conter uma solução do ótima do problema original.

Se a solução de um problema relaxado em um determinado nó apresenta uma solução ótima atendendo às restrições iniciais do problema, não há necessidade de mais ramificações por esse nó. Já se a solução relaxada de um nó apresenta mais de uma variável com valores não inteiros, há a necessidade de escolha de apenas uma para seguir a ramificação. Há muitos estudos na literatura a respeito de regras para tomadas de decisão de quando seguir mais ramos, quais variáveis seguir a frente e quando parar (Qin et. al. 2016). Se o nó 1 não apresentar soluções viáveis, não há solução para o problema inicial.

O nó de número 2, como pode ser visto na Figura 3.8 circulado, apresenta a melhor solução para o problema. Isso se dá porque dentro desse subproblema foi possível encontrar uma solução ótima com as três variáveis binárias. Dessa forma, para avaliar a efetividade de uma solução encontrada em um subproblema, faz-se então a análise da tolerância entre o ótimo encontrado no primeiro nó (chamado limite superior (LS)) com o ótimo encontrado no subproblema (limite inferior (LI)). Da Figura 5 é possível ver que o valor obtido do subproblema é 126, sendo então o LI. Para determinar a melhor solução e o ponto de parada, a Equação 3.12 é uma das mais utilizadas, em que:

$$\frac{GAP}{1+LI} \leq Tol \quad (3.12)$$

Gap é a diferença entre os dois limites (LS-LI) e Tol é o nível de tolerância e é um valor arbitrário, escolhido por quem for solucionar o problema. Essa relação demonstra que quando a diferença entre os limites for tão pequena quanto à tolerância escolhida, o problema encontra seu fim. Para que se tenha uma ideia de ordens de grandeza de valores de tolerância, o Solver do Microsoft Excel utiliza 0.05 como valor, mas nesse exemplo foi utilizado um valor mais rigoroso, de 0.01.

No terceiro nó y_2 inicia sendo igual a 1 para encontrar a melhor solução. O resultado relaxado mostra y_1 com um valor não inteiro e um resultado da função objetivo foi 128.11. Assim, o limite superior para esse ramo e todos seus sucessores é de 128.11. Dessa forma, o Gap agora é de 2.11, com a razão da Equação 3 tendo um valor de 0.0166. Como a tolerância é menor que esse valor, criam-se mais dois ramos avaliando y_1 como zero ou um.

No quarto nó é possível encontrar uma solução viável, com y_1 igual 0, as outras duas variáveis com valores binários e a função objetivo igual a 44, um valor menor do que o já encontrado no nó 2. Portanto esse ramo é descartado.

No quinto nó há outro resultado com valor não inteiro, dessa vez na variável y_3 , com a função objetivo igual a 113.81. Como esse valor é menor que o limite inferior 126, qualquer valor decorrente desse nó, ou seja, qualquer solução de um ramo proveniente do nó 5 será menor que 126. Portanto o nó 5 também é descartado. Dessa forma, a solução ótima é a apresentada no nó 2.

Por ser um método que consegue encontrar resultados ótimos sem precisar de uma enumeração exaustiva de todos os resultados possíveis, o Branch and Bound é um dos algoritmos mais utilizados quando há a necessidade de resolução de um problema com variáveis inteiras.

3.4.5. Redes Neurais aplicadas à otimização

As estratégias computacionais das redes neurais artificiais são modernos métodos que foram adaptados para resolver problemas de otimização matemática. Uma rede neural pode ser considerada com uma imensa rede de processamento em paralelo, onde os processadores (neurônios) recebem informações de entrada, processam essa informação e propagam aos outros neurônios a informação.

As modelagens via Redes Neurais Artificiais - RNA's surgiram como uma alternativa para modelagem de processos onde o enfoque fenomenológico pode ser considerado complexo. Esta é uma tecnologia recente, advinda da Inteligência Artificial, cuja utilização tem sido crescente. Primeiramente, as redes neurais surgiram como reconhecedoras de padrões, com capacidade de reconhecer dados que até então não lhe foram apresentados, ou, de outra forma, reconhecer dados que não constituíram o conjunto de treinamento a que foram submetidas.

A rede é treinada para minimizar os mínimos quadrados dos erros entre as saídas da camada de saídas e o objetivo de saídas inserido na camada de entradas, o erro é minimizado ajustando os pesos que cada iteração tem, entre acertos e erros, sendo esse o principal passo do algoritmo de aprendizagem. Uma vez treinada a rede provê uma rápida e eficiente resposta que mapeia sozinho o melhor caminho.

3.4.6. Heurísticas

Contextualizando problemas de otimização com situações industriais, a otimização por modelagem matemática (programação inteira ou linear, por exemplo) pode não ser a melhor escolha dada a exigência computacional para sua resolução. Até mesmo algoritmos já citados acima podem ser extremamente exaustivos. Diversas empresas tentam otimizar seus resultados utilizando de softwares comerciais, os ERP's, para auxiliarem em seus problemas cotidianos e em seus planejamentos estratégicos. A grande maioria desses ERP's não se baseia apenas em programação ou algoritmos, visto que dependendo da complexidade do problema a solução poderia demorar até quase um dia inteiro para ser obtida, o que é praticamente inviável nos tempos atuais. Por isso, os algoritmos heurísticos estão sendo cada vez mais utilizados como complemento. Algoritmos heurísticos buscam soluções quase-ótimas e custos computacionais razoáveis, sem garantia de real otimização.

A definição etimológica de heurística é encontrar. Polya (1945) relaciona heurística com regras, sugestões, guias ou técnicas que podem ser úteis em progredir na resolução de um problema. O mesmo autor caracteriza também heurística por ser o estudo que visa compreender o fluxo de como se encontram respostas e soluções a situações adversas ou problemas.

Do ponto de vista industrial, em um ambiente onde há a necessidade constante de tomadas de decisão precisas e rápidas, por exemplo, como o setor de programação de produção, o uso de heurísticas muitas vezes é intrínseco. Dar preferência a um produto ao invés de outro devido seu histórico de produtividade e rendimento é uma heurística cujo racional se baseia em priorizar o mais produtivo.

Muitos artigos na literatura fazem uso de heurísticas associadas à modelagem matemática para obterem resultados cada vez mais precisos e de forma ágil. Os Algoritmos Genéticos, previamente citados, são formas modernas e estruturadas de heurísticas para determinação de soluções. Outras heurísticas muito comuns utilizadas para resoluções de problemas de otimização são:

- 1) Simulated Annealing: Essa heurística utiliza uma metáfora de um processo termodinâmico de produção de metais com estruturas de baixa energia. Para a solução de problemas, ela funciona como uma ferramenta de busca local para encontrar resultados próximos ao ótimo.
- 2) Busca Tabu: Essa é outra heurística também baseada em busca local. Porém a Busca Tabu, diferente de outras ferramentas de busca não corre risco de recorrer à vizinhança de menor probabilidade de otimização (ótimo local).
- 3) Colônia de formigas: Se baseia no comportamento de formigas em busca de comida na natureza, de forma cooperativa encontrando o melhor caminho. A forma como a busca acontece se dá através de uma escolha probabilística, em que a decisão é tomada para seguir o caminho com a melhor probabilidade de sucesso.

Além das técnicas abordadas acima, há ainda uma gama imensa de heurísticas aplicadas à resolução de problemas de planejamento e sequenciamento de produção, muito mais relacionadas à sequenciamento, que utilizam de regras simples para determinar a ordem dos produtos a serem produzidos. Algumas das mais usuais que podem ser citadas estão abaixo:

- SPT (Shortest Processing Time) ou Menor Tempo de Processamento – Essa regra basicamente sequencia os produtos conforme o tempo de processamento de cada um. Os produtos de menor tempo de processamento são priorizados.
- LPT (longest Processing Time) ou Maior Tempo de Processamento – Ao contrário da anterior, essa regra prioriza os produtos quanto maior for o tempo de processamento.
- EDD (Earliest Due Date) ou Prazo de Entrega Mais Curto – Essa regra se baseia no prazo de entrega de cada produto e prioriza aqueles que possuem o prazo de entrega mais curto para serem produzidos primeiro.
- FIFO (First In First Out) ou Primeira a Entrar Primeira a Sair – Essa regra se baseia normalmente para gestão integrada entre produtos e estoques, do ponto de vista de entrega de produto acabado também, a qual relaciona a data de produção do item, que quanto mais antigo for, ela deve ser priorizada para consumo.

3.4.7. Aplicações Encontradas na Literatura

Há vários estudos tanto no meio acadêmico quanto no meio corporativo visando a otimização dos sistemas de cadeia de suprimentos. O estudo realizado por Guillén et. al (2006) é um modelo baseado em programação mista inteira linear (MILP), com a tentativa de integrar tanto a parte de supply chain (planejamento e programação) quanto a parte financeira, que envolve custos fixos, depreciação, investimentos, etc. Para tanto, criou-se uma função objetivo única visando a maximização do lucro. Comparou-se o método tradicional (sequencialmente otimizar SCM e em seguida o financeiro) com o método integrado (otimizar simultaneamente SCM e financeiro). Os resultados obtidos através de um estudo de caso mostraram que o uso da integração provoca melhorias significativas se comparado ao método anterior, apresentando um valor quase 14% maior da função objetivo.

A fim de estudar novas possibilidades dentro da programação inteira para soluções de SCM, Baker e Keller (2010) fizeram um comparativo entre seis abordagens diferentes de MILP, para problemas de sequenciamento em processos com uma máquina apenas. Após testar as seis metodologias em vários níveis de dificuldade, foi concluído que não basta escolher apenas a programação inteira para se otimizar um sequenciamento, mas deve-se atentar também ao algoritmo utilizado. Dependendo da escolha, o tempo computacional fica muito grande para trabalhos mais complexos ou até mesmo não se encontra uma resposta satisfatória.

Uma aplicação que vem sendo muito estudada é a otimização multi-objetivo, em que o sistema a ser estudado visa otimizar mais de uma variável. Velez e Maravelias (2013) estudaram a cadeia de suprimentos do hidrogênio, buscando um sistema ótimo para três fatores: custo, Global Warming Potential (índice utilizado para avaliar a contribuição ao efeito estufa) e segurança no processo. O método de programação utilizado por eles foi MILP. Já Liu e Papageorgiou (2013) se basearam no conceito de performance da cadeia de suprimentos para otimizar custo, tempo de fluxo e vendas perdidas (relativo ao serviço com o consumidor).

Analisando a relação hierárquica entre planejamento e sequenciamento, Fumero et.al. (2016) estudaram, através de um modelo de programação linear em um sistema multi-períodos, estratégias em uma planta com diferentes estágios de produção e diversos produtos, levando em conta os aspectos econômicos (custos de produção e estoque) e a melhor alocação dos recursos para atender as demandas de cada produto. Bem como

Sampat et al. (2017), que apresentaram três formas diferentes de se resolver um problema de cadeia de suprimentos em uma planta multi-produtos, utilizando os conceitos de relação hierárquica para avaliar a cadeia de resíduos orgânicos de fazendas do estado de Wisconsin, EUA.

Já Chu et. al. (2015) desenvolveram um algoritmo para resolver um problema de cadeia de suprimentos baseado em um modelo híbrido, que envolve modelagem matemática e uma heurística, trabalhando a relação hierárquica também. Nesse estudo são salientadas as dificuldades de se trabalhar com essa abordagem de hierarquia entre planejamento e sequenciamento, por ser um problema de extrema complexidade computacional e de difícil modelagem matemática, devido às considerações na dimensão do tempo.

3.4.8. Conclusão

Neste capítulo de Revisão Bibliográfica, o objetivo foi apresentar o que é uma cadeia de suprimentos, sua estrutura, principais tipos de problema relacionados ao âmbito industrial e abordagens para sua resolução.

As abordagens via modelagem matemática, apesar de todo seu rigor e dificuldade de resolução são excelentes alternativas para obtenção de resultados, vide esta última seção, em que várias pesquisas recentes são citadas utilizando desses métodos. O avanço tecnológico e investimento em pesquisas vem auxiliando constantemente que modelos mais precisos e que exigem maior esforço computacional possam ser utilizados de forma eficaz. Em um cenário onde há falta de conhecimento específico para modelagem matemática e pouco recurso ou pouco investimento em tecnologia para resolução eficaz desse tipo de problema, soluções como heurísticas ou programação híbrida fazem mais sentido e se aplicam melhor.

No próximo capítulo se discute de forma mais aprofundada o problema de planejamento e sequenciamento na indústria e dois pontos importantes quanto à solução do problema. Há também a apresentação de duas abordagens propostas baseadas nos conhecimentos apresentados no capítulo 3.

4. Propostas de Abordagens para Solução de Problemas de Cadeia de Suprimentos

No capítulo 3 foram apresentadas algumas soluções para problemas típicos de cadeia de suprimentos, desde as soluções por modelos monolíticos e modelagem matemática pura até simples regras que auxiliam nas tomadas de decisão para encontrar uma solução. No entanto, as abordagens de soluções desta classe de problemas possuem duas restrições primordiais quando aplicadas a cenários industriais:

- Tempo de resposta de resolução do problema;
- Ter soluções aceitáveis, não necessariamente factíveis.

Em relação à primeira restrição, o tempo de resposta de resolução de problemas de planejamento e sequenciamento está diretamente relacionado com a flexibilidade da organização em se adaptar à mudança de cenários (Grossman, 2009). Por exemplo, uma empresa que utiliza matérias primas commodities, cujo custo varia de acordo com os mercados das bolsas de valores internacionais, necessita reajustar constantemente seu plano de produção, estendendo ou reduzindo campanhas de produtos de forma a minimizar os impactos da flutuação de preço da matéria prima. Se há atraso na definição do plano de produção, muito dinheiro pode ser perdido nessas ocasiões porque não se teve o senso de urgência adequado ou por não possuir a melhor ferramenta para resolver o problema de planejamento e sequenciamento.

Outra situação em que a velocidade de resposta é fundamental é quando ocorre uma perturbação significativa no sistema, como por exemplo um equipamento parou subitamente, um fornecedor não sendo capaz de entregar uma matéria prima ou até mesmo um aumento expressivo de demanda de um produto. A empresa necessita com velocidade reajustar seu plano de produção enquanto não se volta à normalidade ou até se adequar à nova realidade. Portanto, quanto menor for o tempo para se solucionar um problema de cadeia de suprimentos, melhor.

Quando se pensa em métodos que trazem uma resposta com maior velocidade, os modelos monolíticos e modelos de programação inteira mista não costumam ser os mais indicados quando expostos a um número extenso de variáveis e restrições, principalmente por apresentarem variáveis inteiras (de decisão) que aumentam exponencialmente a dificuldade (dureza) do problema. Por essas razões é possível encontrar diversas empresas

que resolvem esses problemas de cadeia de suprimentos com o uso das ferramentas disponíveis pelos sistemas ERP (Stadtler e Kilger, 2004), customizando ao máximo seus modelos de resolução para cada necessidade. As vantagens de se utilizar um ERP para a resolução do plano de produção, por exemplo, são as facilidades de se ter as respostas, o uso já customizado da ferramenta e a rapidez na obtenção dos resultados. Porém, a desvantagem está na falta de conhecimento adquirido pelo corpo operacional desse sistema, que acaba por não compreender de forma holística como resolver essa classe de problemas, se tornando totalmente dependente do ERP.

A segunda condição, que diz respeito à necessidade de se encontrar soluções aceitáveis, está relacionada com os tipos de restrições que o problema pode apresentar, mas independente dessas dificuldades, uma resposta precisa ser encontrada, pois a empresa precisa dessa informação gerada para tomar uma decisão. Considera-se então que seja uma resposta viável, não necessariamente se enquadrando dentro de todas as restrições do problema. A factibilidade de uma solução se dá quando as respostas atendem a todas as restrições, sejam elas do tipo hard constraints (restrições duras) ou soft constraints (restrições relaxáveis).

As restrições duras são aquelas que não podem ser violadas, são normalmente de natureza física ou organizacional, tendo suas limitações como algo intransponível. O que espera como resposta à essas restrições é que todas sejam atendidas integralmente. Alguns exemplos dessa classe de restrições vinculadas a cadeia de suprimentos são:

- Quantidade máxima de horas trabalhadas por dia;
- Receita de uma reação química e respectivo balanço de massa;
- Limitações referentes a equipamentos já existentes (volume máximo de tanque, vazão máxima de uma bomba, etc..).

O que é possível fazer de conexão com a literatura é que soluções de problemas com apenas restrições duras se adequam perfeitamente nas abordagens clássicas, como as programações lineares (LP), que possuem em sua estrutura de resolução uma função objetivo e equações e/ou inequações que descrevem as restrições duras, como apresentado no capítulo anterior.

Por sua vez, as restrições relaxáveis são aquelas que se gostaria que fossem atendidas o máximo possível, desde que seu atendimento não traga nenhum custo adicional à solução do problema. Alguns exemplos dessas restrições dentro do contexto da cadeia de suprimentos são:

- Prazo de entrega de produtos;
- Quantidade de produtos a serem produzidos por mês;
- Horas extras trabalhadas no mês.

Essas restrições relaxáveis podem ocasionalmente ser ignoradas em favorecimento de uma solução aceitável. É uma opção que traz normalmente um custo agregado a essa decisão, como por exemplo, uma empresa que possui uma política de 40 horas semanais de trabalho por operador, porém surge uma demanda inesperada que necessita de pelo menos 10 horas extras semanais de cada operador para que se atendam os pedidos de um determinado cliente. Dessa forma, viola-se a restrição de horas semanais em detrimento da entrega da quantidade no prazo, que traz um custo adicional proveniente dessa decisão.

Com base nessas informações, resume-se que ter uma solução aceitável na verdade implica em ter uma solução factível que não viole nenhuma das restrições duras, porém não necessariamente tenha que satisfazer todas as restrições relaxáveis, podendo violá-las a um certo custo.

No âmbito da cadeia de suprimentos, é muito comum encontrar problemas envolvendo as restrições duras e leves ao mesmo tempo, bem como a necessidade de se ter uma resposta em um curto prazo. Dessa forma, pode-se observar que a solução por meio de modelagem matemática pura não é a solução mais aplicável para atender às condições apresentadas, uma vez que a forma como as restrições são tratadas interferem diretamente na velocidade de resposta do modelo, bem como na viabilidade de resposta do mesmo.

4.1. Indústria Química e Cadeia de Suprimentos

Há várias características na classe de problemas de planejamento e sequenciamento de produção que possuem as duas grandes necessidades já apresentadas. Portanto, é primordial ter uma perspectiva por parte da organização as quantidades de cada produto que serão produzidas para melhor escolha da abordagem a resolver o problema em um tempo hábil e com soluções aceitáveis.

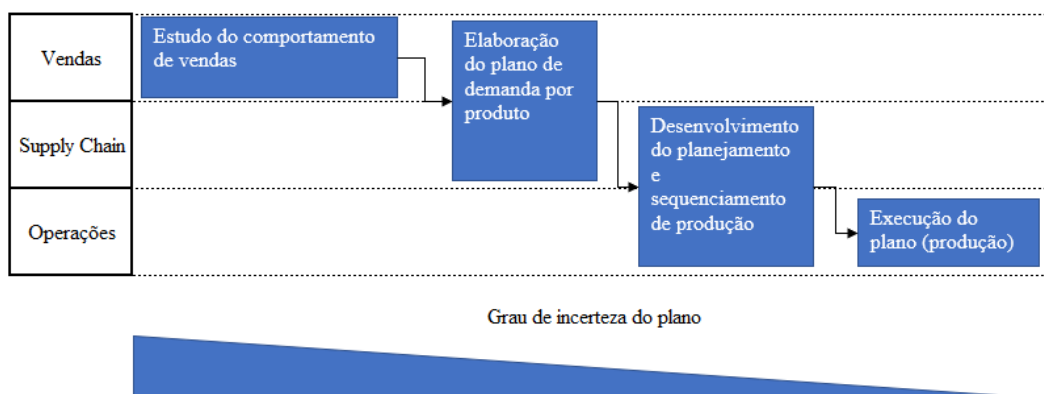
É uma boa prática das grandes empresas realizar anualmente o plano de produção em um horizonte de tempo, que pode ser de um, dois ou cinco anos, baseando-se em previsões de demanda de clientes, sua capacidade de produção ou outra estratégia que se adeque melhor a realidade de cada empresa. Dessa forma, consegue-se visualizar em um período de médio a longo prazo quais as necessidades de produção para cada produto ou família de produtos e confronta-se com a capacidade produtiva. Entrega-se então o plano de demanda agregada, que deverá passar por uma série de detalhamentos para que se possa entender a necessidade de cada produto nos períodos de tempo.

Esta é uma fase crucial do plano de negócios por interligar diversas áreas de interesse da empresa, desde o setor de vendas (se conseguem produzir para vender o prometido) até o setor de logística (onde armazenar os produtos, transporte, prazos de entrega, etc...), conforme mostra Figura 4.1 abaixo. É possível ver que quanto mais se aproxima da execução do plano, menor o grau de incerteza. Uma vez que o plano é construído tendo como base um range de tempo considerável, é comum que esse plano seja revisitado e reajustado ao longo dos meses.

Abaixo estão listados alguns fatores que se fazem presentes no cotidiano corporativo que podem ser agravantes na consolidação de um plano de produção, como:

- As introduções de novos produtos, que exigem da equipe o reajuste da alocação de recursos para produção de mais um item;
- Paradas programadas para manutenção e paradas não programadas;
- Aumento repentino de demanda;
- Aumento do preço de matérias primas;
- Novo concorrente.

A conexão dessa etapa com as duas grandes restrições de problemas de cadeia de suprimentos na indústria é clara quanto à necessidade de tempo de resposta e que são restrições leves. Entender a demanda agregada de forma ágil, podendo resolver o problema novamente dentro de um dia, garante ao negócio flexibilidade para ajustar suas decisões. Quanto a ser uma restrição leve, os planos de demanda não têm limitações físicas ou temporais que são imprescindíveis de serem atendidos, os prazos e quantidade são gerenciáveis, porém, possuem custo quando violadas essas regras.

Figura 4.1: Definição do plano de produção

De acordo com a Figura 4.1, após a desagregação da demanda, ocorre a elaboração do plano de produção. Essa etapa se enquadra nos problemas do tipo planejamento e sequenciamento de produção, que serão abordados mais adiante neste capítulo.

4.2. Propostas de Solução

O problema que se quer resolver tem como características principais a necessidade de uma resposta aceitável e que seja de rápida resolução, além de possuir as características típicas de um problema de planejamento e sequenciamento de produção, que agregam grande complexidade. Como dito anteriormente, por diversas razões, as abordagens de modelagem matemática pura não são as mais adequadas para sua resolução. Portanto, esse trabalho propõe duas abordagens diferentes que buscam resolver este tipo de problema de cadeia de suprimentos e atender às duas restrições cruciais.

As abordagens propostas são mais flexíveis que as por modelos monolíticos ou modelagem matemática e tem como objetivo serem capazes de acomodar a dinâmica e as intercorrências que são observadas na rotina industrial. A primeira proposta é a de solucionar o problema de planejamento e sequenciamento utilizando um sistema baseado em regras específicas, que vão dar as diretrizes para o planejamento e sequenciamento de produtos e a quantidade de cada produto a ser produzida. Dessa forma, para essa abordagem foi desenvolvido um algoritmo restrito às regras propostas de forma a convergir o problema a um resultado plausível em um tempo operacional e computacional baixo. Já a segunda proposta visa resolver o problema de outra forma, através de uma abordagem segmentada em uma hierarquia entre planejamento e sequenciamento,

mesclando modelagem matemática para o problema de planejamento, com heurísticas de decisão para o problema de sequenciamento.

4.3. Abordagem Heurística

Uma abordagem de solução heurística, ou seja, técnicas de construção de soluções baseadas em decisões, pode ser útil quando o grau de complexidade do sistema é tamanho que se torna mais rápido e viável de se chegar a um resultado factível ao invés da alternativa de uma solução via modelagem matemática. Em abordagens heurísticas, o ponto ótimo deixa de ser prioridade e não se consegue atingi-lo, mas consegue se encaixar muito bem nas restrições do sistema, sem muita exigência de esforço computacional. São consideradas como relaxamento (flexibilização) do ponto ótimo, ou soluções sub-ótimas.

Pode-se dizer que a abordagem utilizada se assemelha a um especialista da área de Supply Chain resolvendo esse problema. Através de todo seu conhecimento e experiências, ele dita escolhas e caminhos a seguir de forma a encontrar uma solução para o problema em tempo e custo viáveis para a organização. Portanto, essa abordagem se enquadra como um sistema especialista, uma categoria de sistemas utilizados em Inteligência Artificial, que simula um processo de tomadas de decisão baseado em um conhecimento de um especialista no assunto, com regras e conhecimento prévio.

Essa abordagem heurística é composta pelas seguintes regras:

- 1) Para toda quantidade de produto a ser vendida, de acordo com a previsão de demanda, essa quantidade deve ser realizada em apenas uma ordem de produção, ou seja, não há transição de produto até que se termine produzir o que se tinha no plano de demanda. Por exemplo, conforme Tabela 4.1, se o Produto 1 tem uma quantidade de 300 unidades para serem vendidas no mês 1, a produção deverá ser ininterrupta nesse produto até que as 300 unidades sejam feitas para então passar ao produto seguinte. Não há quantidade mínima nem máxima definida por produto. É decidido que cada produto deva suprir a demanda em apenas uma campanha, como num sistema sob encomenda.

Tabela 4.1: Exemplo referente à primeira regra.

Mês	Produto 1	Produto 2	Produto 3
1	300	200	100
2	250	300	120

- 2) A sequência de troca de um produto para o outro fica estabelecida de uma forma rígida de acordo com o resultado otimizado da matriz de setup para troca de produtos. Isso significa que sempre a sequência de um produto para o próximo é constante. Por exemplo, considerando a Tabela 4.2 abaixo como uma matriz de setup (com o tempo em horas) para troca dos produtos P1, P2 e P3, é possível ver que a melhor sequência é P1-P3-P2-P1 e assim sucessivamente. O que essa regra impõe é que essa ordem seja constante.

Tabela 4.2: Matriz de setup como exemplo para a segunda regra.

De \ Para	P1	P2	P3
P1	0	5	1
P2	3	0	4
P3	3	2	0

- 3) Mesmo se o produto que estiver sendo fabricado no fim do mês e o tempo não for suficiente para completar a ordem de produção para aquele mês, ele deverá continuar começando o mês seguinte, com uma ordem nova de produção somando o que ficou pendente do mês anterior com a ordem do mês atual. O mesmo vale se mais de um produto ficou sem completar a ordem inteira. Dessa forma, essa regra visa reduzir o desperdício de tempo de setup maximizando o tempo de processamento do produto que precisa ser produzido. Para o caso contrário, de sobra de tempo disponível, a fábrica fica parada. Esse tempo serve como tempo hábil para manutenção e reparos na planta (total programado para o ano, por exemplo). É possível ver na Tabela 4.3, por exemplo, o caso dos três produtos (P1, P2 e P3) com a demanda de cada um para três meses. Na Tabela 4.4 tem-se os efeitos dessa regra, onde se vê que para o produto P3, em que não conseguiu se atingir a quantidade necessária de sua demanda para o mês 1, e a quantidade faltante (nesse caso 10 unidades) é adicionada à demanda do mês seguinte. O mesmo acontece

com P1 no segundo mês, quando não consegue produzir toda a demanda e para o terceiro mês essa diferença é adicionada.

Tabela 4.3: Demanda original para o exemplo da terceira regra.

Produto	Demanda mês 1	Demanda mês 2	Demanda mês 3
P1	100	100	100
P2	80	90	75
P3	120	140	100

Tabela 4.4: Produção vs demanda por produto relativo à terceira regra

Produto	Demanda mês 1	Produzido mês 1	Demanda mês 2	Produzido mês 2
P1	100	100	100	90
P2	80	80	90	90
P3	120	110	150	150

Assim, seguindo as três regras do modelo heurístico, é possível encontrar uma resposta plausível em um tempo curto e com baixo esforço computacional. Vale ressaltar que esse modelo foi desenvolvido para processos de um equipamento compartilhado com diversos produtos e que para grandes quantidades de produtos, haverá necessidade de se programar um problema do tipo caixeiro viajante para a solução da segunda regra.

4.4. Abordagem Híbrida

De forma a buscar uma solução alternativa, tomando como base os padrões do problema de planejamento e sequenciamento integrados, optou-se por uma modelagem híbrida, interligando modelagem matemática e heurísticas.

Problemas de planejamento e sequenciamento integrados, quando tratados como modelos matemáticos, apresentam números de variáveis e equações muito elevados, o que torna o processamento do sistema muito difícil e com tempo de resposta longo. Em muitos casos, devido à grande quantidade de restrições, variáveis e equações, não é possível sequer encontrar uma resposta viável.

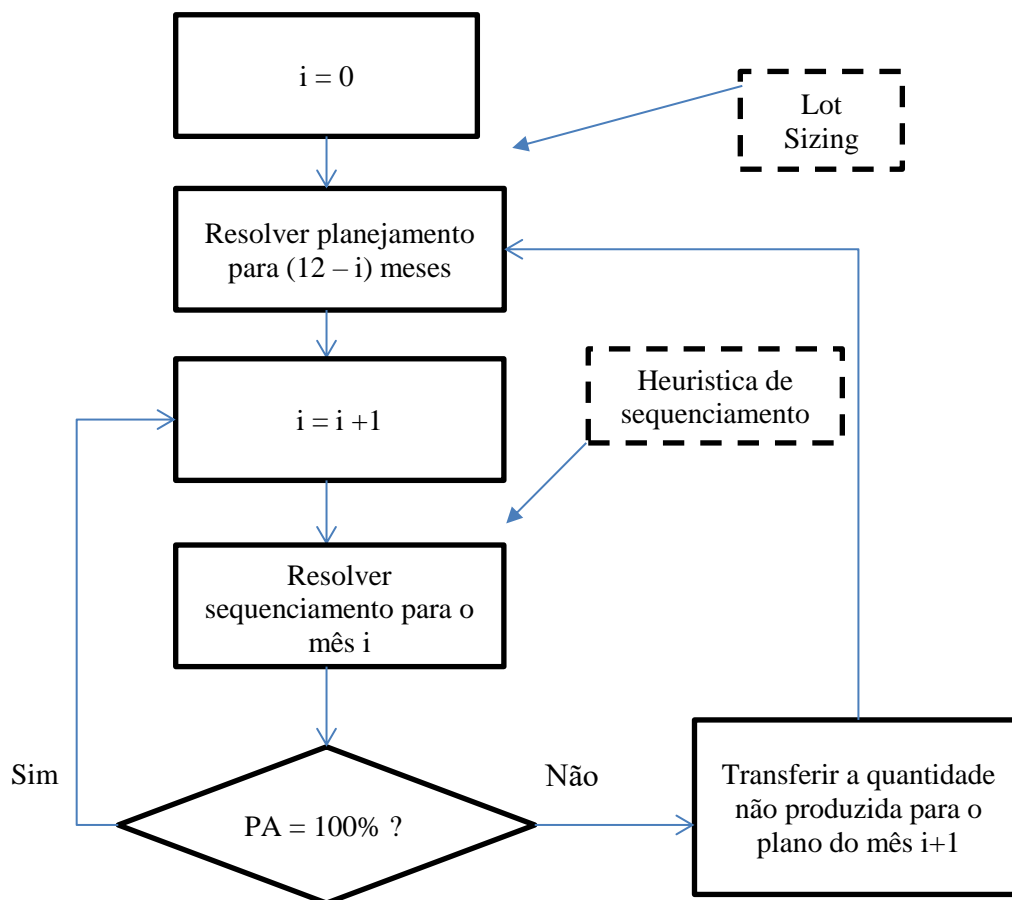
Além do elevado número de variáveis e equações, outra grande influência para a dificuldade na modelagem é a tratativa do tempo. Tratar o tempo como uma variável contínua tornaria o modelo mais preciso, porém seriam mais variáveis e equações acrescidas ao modelo. Portanto, uma solução usual para essa questão é tornar o tempo uma variável discreta, e considerar apenas como um bloco fechado, o que torna o problema simplificado a ponto de perder detalhes do que se passa dentro do tempo discreto.

Buscou-se então uma abordagem que pudesse trabalhar de uma forma sistematizada, fugindo de um sistema puramente especialista, com um teor de modelagem e heurísticas que habilitam a resolução do problema em tempo e esforço computacional viáveis.

Dessa forma, a metodologia do Horizonte Rolante foi aplicada na abordagem com o objetivo de lidar com o tempo de forma discreta. Assim, a cada fim de período, se torna possível ter a previsibilidade dos demais períodos adiante, através da retroalimentação dos resultados. Outro ponto importante a salientar é a hierarquia entre planejamento e sequenciamento, em que foi determinado que o planejamento é prioritário em relação ao sequenciamento.

A seguir, na Figura 4.2, encontra-se o algoritmo desenvolvido para essa abordagem. Aqui é possível ver a relação de hierarquia já mencionada, quando no algoritmo a resolução do planejamento deve ocorrer primeiro para que essa solução seja os dados de entrada para se resolver o problema de sequenciamento. Já a recursividade apresentada na continuidade dos meses (i) representa a heurística de Horizonte Rolante, que vai carregando o estoque excedente ou faltante do mês anterior para os demais meses, quando necessário.

Figura 4.2: Fluxograma para aplicação da abordagem híbrida.



A seguir, tem-se a interpretação do fluxograma através de cada etapa:

- 1) Resolver o problema de planejamento para os N meses da previsão de demanda como um problema do tipo MILP para Lot sizing. O cálculo se dá com base na maximização da porcentagem de atendimento (PA) mensal dos produtos, tendo como restrições tempo e capacidades. A variável independente é a quantidade de bateladas de cada produto.
- 2) Com a quantidade a ser produzida para cada produto definida pelo planejamento, inicia-se a resolução do sequenciamento para o primeiro mês. Para a resolução é utilizada uma heurística para tratar da priorização. Prioriza-se então o produto com o maior potencial de custo (produto da quantidade a ser fabricada e o custo unitário). Termina-se o sequenciamento obedecendo a regra estabelecida e o limite de tempo

disponível, avalia-se se do sequenciamento houve a entrega de 100% dos produtos conforme previsão de demanda para o mês.

- 3) Se sim, passa-se para o mês seguinte. Se não, o montante de cada produto que não foi capaz de ser feito acumula-se para o próximo mês.
- 4) Assim, com a quantidade acumulada do mês anterior, repete-se o passo 1, até que se completem todos os meses do período referente ao planejamento de demanda.

Esse algoritmo consegue trabalhar a relação entre planejamento e sequenciamento através da relação hierárquica entre eles e através da retroalimentação. Um ponto importante a ressaltar desse algoritmo é a forma como foi tratado o tempo, com meses como blocos discretos de tempo e que a resolução de cada bloco (mês) é tratada sequencialmente. Outro ponto importante é o emprego da metodologia de Horizonte Rolante, que de forma dinâmica, através da retroalimentação, garante que sempre que houver produções pendentes os mesmos serão alocados nos meses seguintes.

A seguir, as fases de planejamento e sequenciamento do algoritmo serão melhor detalhadas.

4.4.1. Planejamento

O planejamento, etapa que consiste em verificar o sistema de uma forma macroscópica, enxergando como serão os resultados ao longo dos meses do período desejado, se resolvido de maneira isolada do sequenciamento se enquadra muito bem como um problema de Lot Sizing.

Problemas que envolvem planejamento de produção são cruciais para uma cadeia de suprimentos, uma vez que conseguem dar maior previsibilidade e suporte às decisões corporativas. Em total sincronia com o planejamento, a metodologia de Lot Sizing é comumente utilizada para solucionar um problema de planejamento com o intuito de minimizar os custos da cadeia, maximizar o plano de atendimento a clientes ou puramente reduzir níveis de estoque, seja de matéria prima ou produto acabado. Para esse trabalho, o Lot Sizing será aplicado para maximizar a entrega de produtos.

De forma hierárquica, os resultados obtidos após a resolução do planejamento serão os dados de entrada para o problema de sequenciamento. Conforme o algoritmo

apresentado, a retroalimentação acontece no fim de cada mês, sendo tomada uma decisão dependendo da performance do sequenciamento. Se o resultado for um atendimento de 100% para o mês, não há alteração do planejado para o mês seguinte. Se for menor, o planejamento deverá ser realizado novamente a partir daquele mês até o fim.

A seguir as equações de função objetivo e restrições para o modelo de planejamento são apresentadas. Em seguida, será mostrado como os resultados obtidos pelo planejamento se tornam os dados de entrada para o sequenciamento.

Dados os índices i para produto e j para mês, tem-se como função objetivo:

$$\max \quad \sum_i \sum_j \frac{L_{i,j}}{D_{i,j}} \quad (4.1)$$

Em que $L_{i,j}$ representa a alocação do produto i no mês j e $D_{i,j}$ significa a demanda referente ao produto i no mês j . Portanto, a Equação 4.1 nada mais significa do que tentar alocar o máximo de cada produto para atender a demanda mensal.

$L_{i,j}$ é um função da quantidade de bateladas ($BT_{i,j}$) realizadas no mês, mostrada na Equação 4.2, em que n é a capacidade produtiva do equipamento compartilhado (tamanho da batelada, por exemplo).

$$L_{i,j} = n \cdot BT_{i,j} \quad (4.2)$$

Como restrições, tem-se a condição de não se produzir mais do que se tem de demanda mensal, não gerando estoque e se propagando para os próximos meses. Na Equação 4.3 isso se reflete na inequação da razão do somatório dos produtos produzidos e a demanda de cada produto por mês tendo de ser menor ou igual a 1.

$$\sum_i \frac{L_{i,j}}{D_{i,j}} \leq 1 \quad (4.3)$$

A outra restrição é a de capacidade. Essa restrição está relacionada a quanto se consegue produzir de cada produto i por cada mês j . A Equação 4.4 abaixo mostra essa limitação de capacidade através do tempo total possível de produção em um mês de operações. Foi considerado o tempo total em 720 horas (30 dias por mês, 24 horas por dia).

$$\sum_i BT_{i,j} \cdot B_i \leq 720 \quad (4.4)$$

B_i mostrado acima representa o tempo de batelada em horas para cada produto i . Logo, o somatório do tempo de produção para todos os produtos em um mês tem que ser menor ou igual a 720 horas.

Finalizando, a última restrição é de que a quantidade de bateladas de cada produto por mês seja um número inteiro positivo, mostrado na Equação 4.5.

$$BT_{i,j} \in \mathbb{N} \quad (4.5)$$

Dessa forma, resolvendo o problema de planejamento, tem-se os dados de entrada para iniciar o sequenciamento e de acordo sua performance, o planejamento gerado pela primeira vez pode sofrer mudanças até que se termine de alocar as necessidades de demanda para todos os meses.

4.4.2. Sequenciamento

Através dos resultados obtidos na solução do problema de planejamento, inicia-se então a solução do problema de sequenciamento. A grande missão dessa etapa é maximizar a quantidade de produtos, de acordo com o plano, dentro do range de tempo disponível em cada mês.

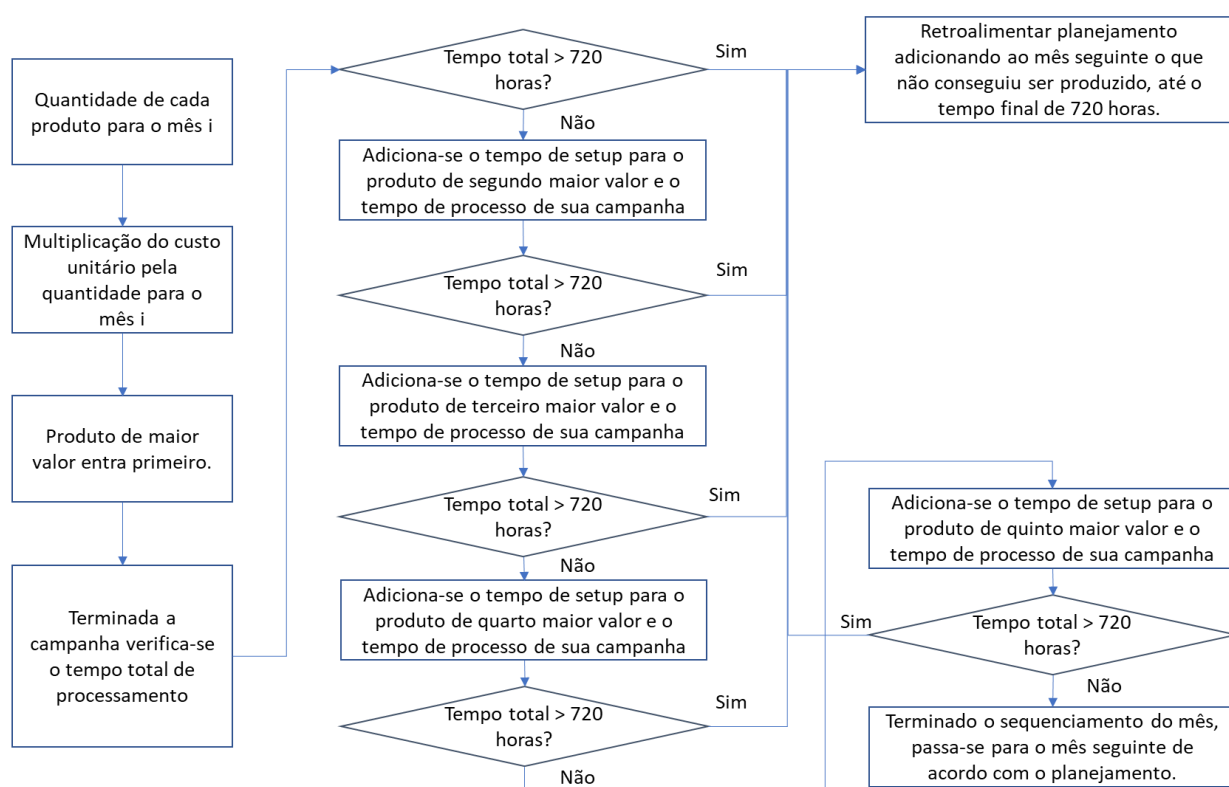
Existem diversas estratégias diferentes para lidar com sequenciamentos de máquinas compartilhadas, como é possível ver no capítulo 3, desde de regras heurísticas à modelos monolíticos. Para esse trabalho, a opção escolhida foi criar uma regra específica para esse caso, em que após o programa gerado para o determinado mês,

escolhe-se o produto baseado no custo associado ao risco de desabastecimento. Isso significa que o produto que apresentar para o determinado mês o maior valor da multiplicação entre a quantidade a ser produzida e o custo unitário do produto será priorizado.

Essa regra retrata uma possível realidade em que pode haver a priorização do que deve ser produzido muitas vezes se baseando não na quantidade de lucro que se gera, mas simplesmente na quantidade que deveria ser produzida conforme a previsão. Pela forma como este trabalho prioriza a escolha de cada produto, a chance de se ter um desabastecimento de um produto de mais alto valor agregado é reduzida.

Na Figura 4.3 abaixo se encontra o algoritmo de tomada de decisão para priorização de produtos no sequenciamento.

Figura 4.3: Heurística de decisão para sequenciamento



O fluxograma mostrado contém um importante elemento do modelo híbrido, que é a questão da interação com a hierarquia. Ao fim de toda campanha de cada produto é feita a verificação se o tempo máximo de cada mês é atingido. Quando a produção se limita ao tempo, não sendo possível terminar tudo que havia sido planejado para o mês,

ocorre a transposição do excedente de material a ser produzido para o mês seguinte. Essa foi a estratégia encontrada para lidar com o tempo discreto, de forma a interligar tanto os intervalos de tempo, os estoques de produto entre os mesmos e a hierarquia do modelo, onde o sequenciamento é dependente do planejamento que é retroalimentado pelo sequenciamento.

Outro ponto importante é que diferentemente da primeira abordagem puramente heurística, há uma autonomia muito maior desse modelo quanto a ordem dos produtos e as trocas entre os mesmos. Na primeira abordagem, toda troca de produto já é pré-estabelecida conforme a matriz de setup e se mantém para todo o período de tempo da mesma forma. Já na abordagem híbrida, essa ordem fica inteiramente dependente das variáveis volume de produção mensal e custo de produção, podendo assim, mudar a prioridade a cada mês, realizando trocas de produto que possuem tempo de setup mais alto.

Baseado nessas abordagens de solução para o problema de planejamento e sequenciamento, o próximo capítulo tratará de um exemplo de aplicação das abordagens propostas, envolvendo um cenário de produção que se aproxima de uma situação real de indústria, visando mostrar a aplicabilidade de cada abordagem e como cada uma performa.

5. Exemplo de Aplicação

Este capítulo visa elucidar, através de um exemplo de aplicação, a utilização de duas abordagens para solução do problema industrial típico de cadeia de suprimentos, envolvendo planejamento e sequenciamento de produção. Nesse capítulo ainda serão abordadas questões como necessidade de se ter soluções aceitáveis, a dificuldade de se utilizar modelos matemáticos como MILP e o modo como cada abordagem performa.

No capítulo anterior foram apresentadas as principais características de um problema de cadeia de suprimentos envolvendo planejamento e sequenciamento de produção bem como duas propostas de abordagens para soluções que atendam aos requisitos de tempo de resposta e soluções aceitáveis.

A proposta de aplicação é um exemplo de uma situação possível para um ambiente industrial, onde há a necessidade de lidar com equipamento e matérias primas compartilhados, quantidades a serem atendidas em períodos de tempo, custos, setup para troca de produtos, entre outras situações. Ou seja, é um problema desenhado para conter restrições duras e leves, que possui uma característica semelhante ao cotidiano industrial em que há a necessidade de tomar decisões a partir de informações aceitáveis de forma ágil.

O exemplo contempla um sistema onde há um reator de mistura em batelada compartilhado para 5 produtos diferentes em que cada um possui uma receita específica e para fabricá-los utilizam-se 4 matérias primas diferentes. Há também atribuído o custo de cada matéria prima, bem como os custos horários de operação e as penalidades de estoque e desabastecimento. Um plano de demanda para um período de 12 meses é proposto como dado entrada para determinar as quantidades de produto necessárias por mês. O exemplo proposto é fictício, sendo todos os dados e informações elaborados exclusivamente para esse trabalho.

5.1. Processo Produtivo

A estrutura do processo produtivo do estudo de caso é composta por um sistema de fornecimento, em que três fornecedores diferentes conseguem fornecer todas as matérias primas necessárias, porém com preços e capacidades de entrega (em unidades de massa (UM)) diferentes (Tabela 5.1). Para este estudo, os tempos de entrega dos

materiais pelos fornecedores serão desconsiderados. Portanto, cada matéria prima que se necessita será entregue instantaneamente à produção, sem necessidade de armazenamento prévio. O estudo da estrutura de capacidade das matérias primas será abordado mais a frente.

Tabela 5.1: Lista de fornecedores e matérias primas.

Fornecedor	Matéria Prima	Capacidade (UM)	Custo (\$)
F1	MP1	200	50,00
	MP2	200	35,00
F2	MP1	150	45,00
	MP3	200	75,00
F3	MP2	300	50,00
	MP3	300	80,00
	MP4	300	100,00

Cada matéria prima será utilizada conforme a receita (Tabela 5.2) para produção dos cinco possíveis produtos. O processo produtivo ocorre em um único reator batelada, que será compartilhado entre todos os cinco produtos. A capacidade de cada batelada, por projeto do equipamento, é de 5 UM.

O que a Tabela 5.2 representa é, por exemplo para o produto P3, que para cada unidade do produto P3, precisam ser misturadas uma unidade da matéria prima MP2 e uma unidade da MP3.

Tabela 5.2: Receita

	P1	P2	P3	P4	P5
MP1	1	1	0	1	0
MP2	1	0	1	1	0
MP3	0	1	1	0	1
MP4	0	0	0	1	1

Uma vez misturadas no reator as matérias primas necessárias para produção de cada produto, a mistura deve aguardar o tempo de reação específico, por produto, para que a batelada seja descarregada para seu acondicionamento. Na Tabela 5.3 encontram-se os tempos de receita por produto.

Tabela 5.3: Tempo de fabricação por produto.

Produto	Tempo/batelada
P1	300 min
P2	250 min
P3	275 min
P4	300 min
P5	300 min

Com a carga da batelada descarregada, tem-se um tempo de setup entre bateladas. Para setups do mesmo produto, o tempo que se leva para preparar o reator para uma nova carga é de 5 minutos. Para o caso de troca de produto o tempo de setup acontece de acordo com a Tabela 5.4, que mostra a matriz setup. A matriz mostra o tempo que se leva para se preparar o reator que sai de uma batelada de um produto para outro.

Tabela 5.4: Matriz Setup (tempo em horas)

De/Para	P1	P2	P3	P4	P5
P1	0	5	7	3	8
P2	6	0	5	6.5	7
P3	7	6.5	0	5	7
P4	5	7	8	0	4.5
P5	6	8	5	7	0

Em relação à armazenagem de produtos, não será considerada nesse estudo. Portanto, apenas serão consideradas as etapas de compras de matérias primas e produção. O sistema de armazenagem será considerado como um fluxo direto da saída do reator, sem restrições de fluxo. Não há tanques na saída do reator e nem limitações quanto ao período de entregas. Os produtos não possuem tempo de vida útil, ou seja, não deverá ser considerado um prazo de validade para que ele seja despachado dentro de sua especificação.

A estrutura que o sistema possui para as matérias primas pode ser definida como multifornecimento. Tem-se nesse sistema 3 tipos de fornecedores que compartilham entre si as mesmas matérias primas, porém com capacidades diferentes em quantidade e custos diferentes. Vale lembrar que para esse estudo, não será considerado lead time de entrega

de material por parte dos fornecedores, ou seja, os fornecedores têm cada um dos materiais instantaneamente. E para finalizar, nesse sistema não há reaproveitamento de material pós-reação, portanto todo material utilizado na reação será consumido.

Entendendo melhor como se apresenta o sistema de fornecimento é possível visualizar algumas características importantes que auxiliam nas tomadas de decisão na elaboração do plano de produção.

Abaixo é possível ver a tendência de consumo das matérias primas nas Figuras 5.1 a 5.4, utilizando a explosão das matérias primas através da receita de cada produto (Tabela 5.2) e pela previsão de vendas (Tabela 5.5). É evidente que há bastante espaço entre o que se pretende utilizar desses materiais e suas capacidades de fornecimento. A única questão é que seu suprimento será provido de dois fornecedores diferentes, dadas às condições de capacidade de cada um deles. Essa análise é muito importante no âmbito da cadeia de suprimentos por dois motivos (Chitale e Gupta, 2014):

- 1) Quando se pensa em fornecedores de matérias primas essenciais para o processo produtivo, vale lembrar sempre que um fornecedor corre o risco de não conseguir suprir a demanda necessária. Portanto ter mais de uma fonte de suprimento é uma estratégia conservadora, porém assegura com baixo nível de risco um desabastecimento.
- 2) Normalmente se estabelece um preço de venda de um produto baseado na quantidade produzida/vendida do mesmo e através de funções exponenciais negativas em que maior a quantidade vendida, menor o preço de venda por unidade. Nesse exemplo se estabeleceu um preço fixo para cada fabricante e sua matéria prima, porém é comum empresas dividirem seus fornecedores para balancear o efeito do preço pela quantidade e manter ao menos duas fontes de fornecimento.

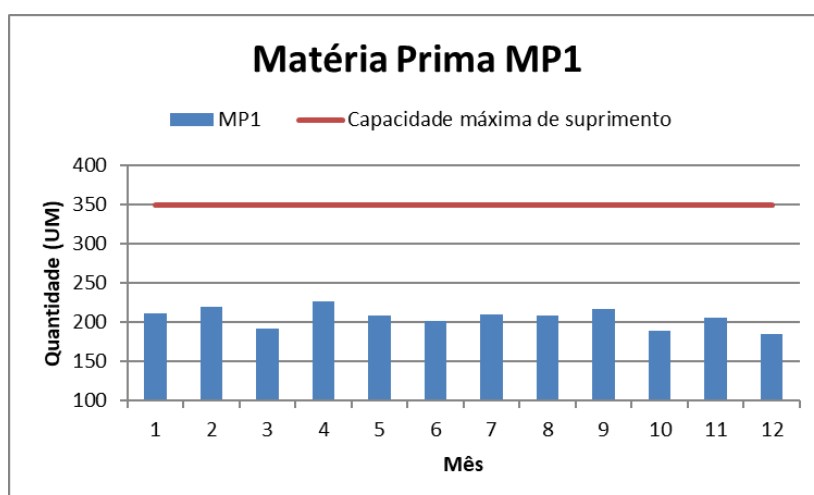
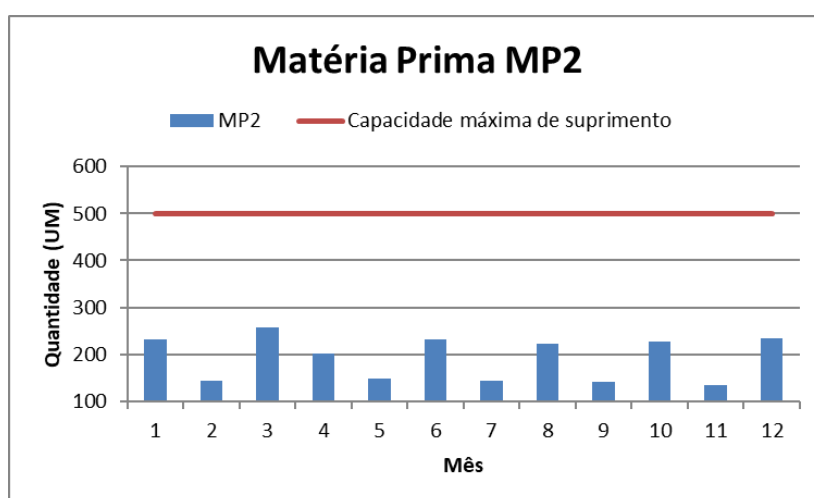
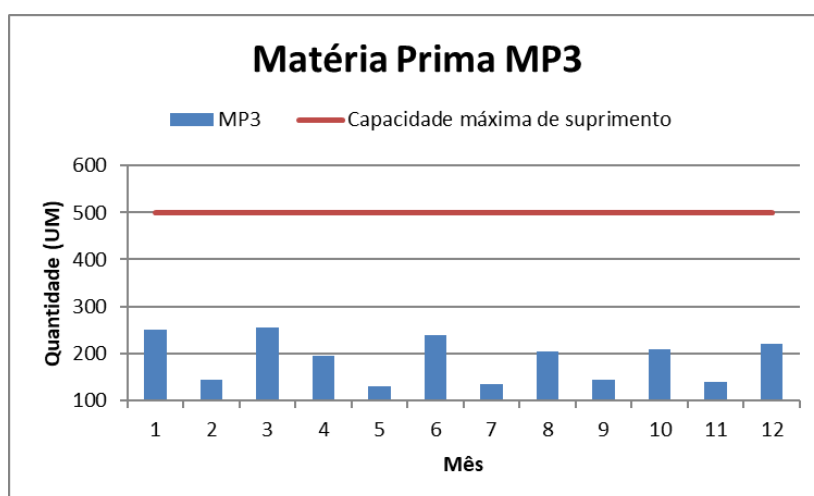
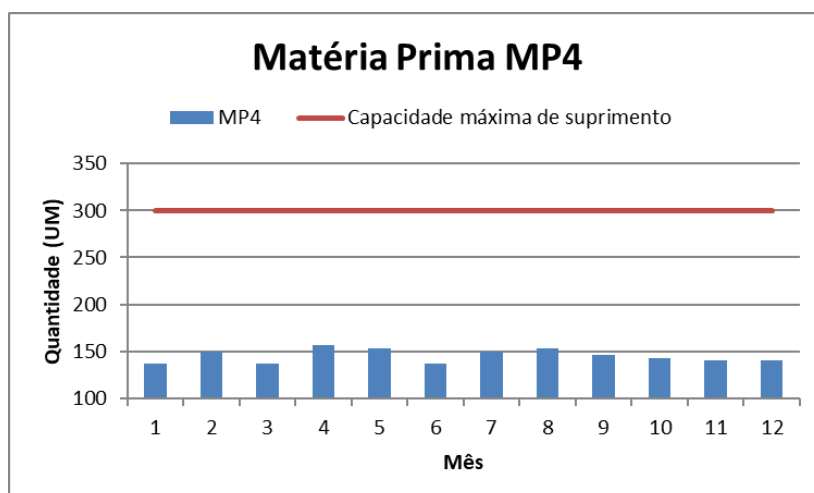
Figura 5.1: Tendência da capacidade de suprimento da matéria prima MP1**Figura 5.2: Tendência da capacidade de suprimento da matéria prima MP2****Figura 5.3: Tendência da capacidade de suprimento da matéria prima MP3**

Figura 5.4: Tendência da capacidade de suprimento da matéria prima MP4

O grande valor extraído da análise acima é o conhecimento das capacidades do sistema de fornecimento. Esse conhecimento permite a quem controla o planejamento e sequenciamento da produção ter mais robustez e assertividade quanto ao que se deseja produzir pelo plano de vendas, ao menos no que tange a necessidade de material. Dessa forma é possível trabalhar com estoques otimizados, sem precisar acumular excesso de matéria prima e não há necessidade também de sair em urgência desenvolvendo novos fornecedores para garantir a produção.

Todo o conteúdo discutido até o momento inclui algumas características que tornam ainda mais complexa a solução desse tipo de problema por um modelo puramente matemático, como um MILP, por exemplo. O fato de se ter modelos de equações não lineares para relacionar o preço das matérias primas, diferentes fornecedores para se escolher, consumo das matérias primas variando ao longo do tempo, todos esses fatores contribuem para que a solução fique computacional e matematicamente difícil de se obter, violando uma das necessidades do problema da cadeia de suprimentos.

5.2. Estrutura de Demanda

O estudo da estrutura de demanda é um passo muito importante para o completo entendimento do sistema da cadeia de suprimentos. Cada empresa possui um planejamento específico para seus produtos conforme as condições de operações, sobre como seus recursos estão definidos, bem como sua demanda varia de produto a produto e por períodos de tempo. A análise dessa estrutura é de extrema importância quanto aos

custos de produção e armazenagem e também em relação ao quanto de cada produto se estima entregar ao cliente naquele período, para que não haja falta de produto nem excesso no estoque.

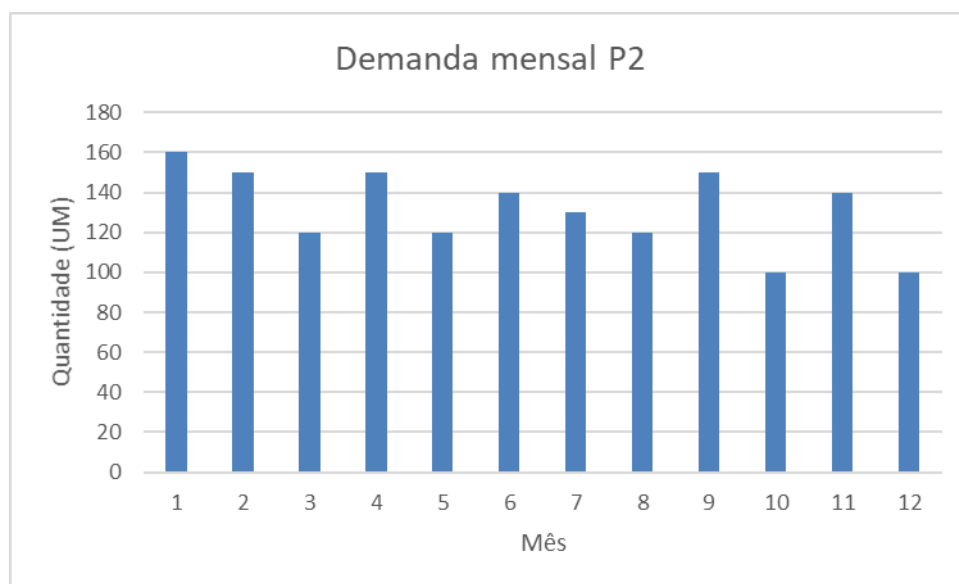
Para este estudo de caso, a previsão de vendas para um ano dos cinco produtos é apresentada na Tabela 5.5 abaixo.

Tabela 5.5: Previsão de vendas mensal de cada produto (em UM).

Mês	P1	P2	P3	P4	P5
1	130	160	200	200	140
2	130	150	0	240	140
3	130	120	250	200	140
4	130	150	100	260	140
5	130	120	0	250	140
6	130	140	200	200	140
7	130	130	0	240	140
8	130	120	150	250	140
9	130	150	0	230	140
10	130	100	180	220	140
11	130	140	0	210	140
12	130	100	200	210	140

É possível ver que cada produto possui uma característica diferente em relação às quantidades a serem pedidas mensalmente. Os produtos P1 e P5, por exemplo, possuem demandas mensais constantes na mesma quantidade. Isso leva a uma reflexão a respeito da quantidade a ser produzida, pois em um cenário real, se há precisão suficiente nessa previsão é evidente que os valores não irão muito longe do previsto, portanto não se teriam incertezas suficientes para que sejam produzidas quantidades muito maiores ou muito menores que o demandado. Porém, como não são somente esses produtos a serem vendidos, não adianta simplesmente produzi-los na quantidade demandada e terminar o mês sem entregar produtos que possam ter maior valor agregado.

O produto P2 possui uma demanda conforme a Figura 5.5 abaixo:

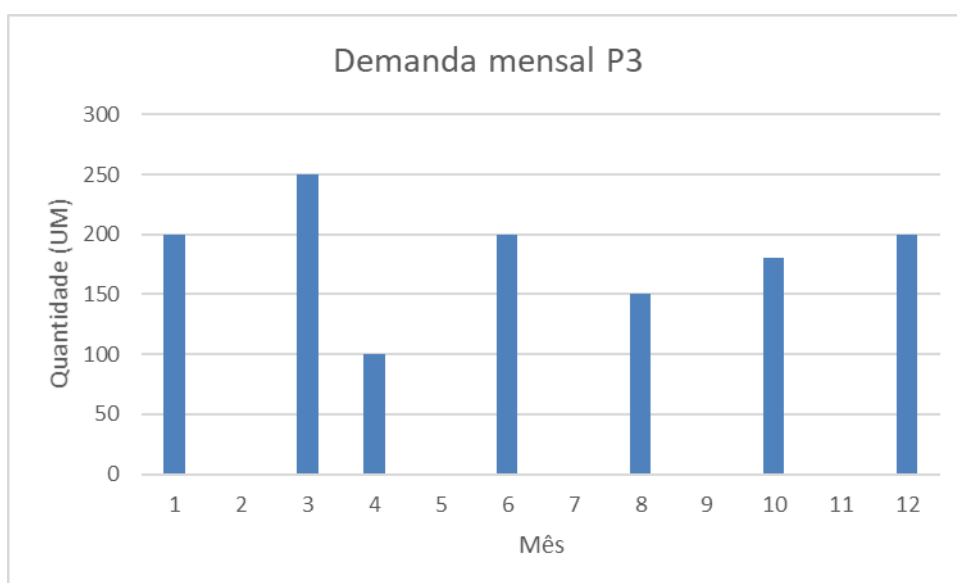
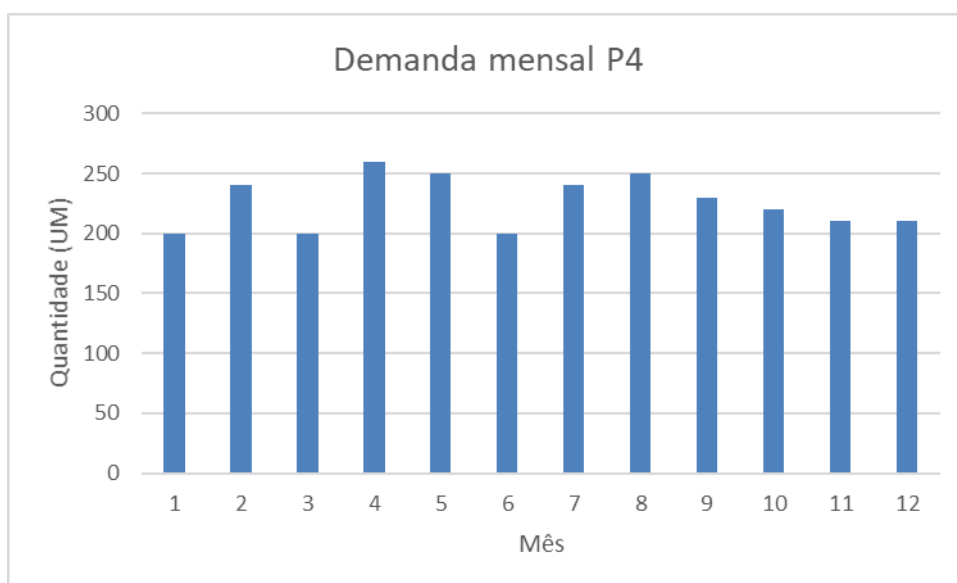
Figura 5.5: Demanda mensal do produto P2.

É possível perceber que para esse produto as vendas mensais são flutuantes, porém com um perfil decrescente. Para este caso é muito importante avaliar as quantidades a serem produzidas principalmente nos últimos 4 meses, uma vez que há uma flutuação maior que nos meses anteriores, e caso haja algum distúrbio ou evento inesperado que faça com que as vendas variem ainda mais, pode haver excesso em estoque ou falta de abastecimento do produto.

Para o produto P3, na Figura 5.6 encontra-se sua demanda.

A demanda desse produto mostra claramente uma sazonalidade. Diferente de P2, ele oscila muito entre o período inteiro dos 12 meses. Porém sua variação é praticamente igual entre os meses, tornando-o um mais previsível que P2. Com essa demanda, variando bastante mês a mês, é interessante aproveitar para produzir esse produto, mesmo que em menores quantidades mesmo nos meses em que não há venda, uma vez que no próximo já é esperado uma grande quantidade.

Já a demanda de P4 é apresentada na Figura 5.7.

Figura 5.6: Demanda mensal do produto P3.**Figura 5.7: Demanda mensal do produto P4.**

Esse produto possui uma estrutura de demanda que se assemelha a uma mistura de P2 e P3. Uma demanda oscilante, não chegando a ser zero em alguns meses, mas com flutuações consideráveis, e uma tendência de queda nos últimos meses. Uma informação importante é a respeito do volume requerido para esse produto. Ele possui a maior média de demanda, portanto deve exigir bastante tempo de operação em alguns meses, podendo gerar conflito com outros produtos quanto às entregas e estoques.

Da mesma forma como é feito com a estrutura de matérias primas, vale ressaltar que o conhecimento adquirido com essas análises de tendências de demanda também gera

enorme valor quanto a previsibilidade e assertividade do plano de produção. Conhecer se um produto possui um perfil cíclico, por exemplo, permite a quem planeja a produção ou nivelar do ponto de sempre estar produzindo uma mesma quantidade, próxima à média dessa oscilação, ou se possível, produzir apenas quando há a necessidade, que seria o melhor cenário para redução de estoques.

5.3. Estrutura de Custos

A estrutura de custos, assim como a estrutura de demanda, representa uma parte muito importante do sistema, do ponto de vista do objetivo do problema. Os custos de produção, armazenamento e matérias primas são as bases para a tomada de decisão quanto ao que produzir, quando e quanto.

Os custos de matéria prima e produção são custos diretos, proporcionais a quantidade produzida. O custo de armazenamento vem do princípio de que produto em estoque é dinheiro parado, portanto consta como desperdício. Para esse estudo de caso o custo de armazenamento será tratado de uma forma proporcional ao excedente em relação à previsão de vendas, uma prática bem usual, conforme a literatura (Chitale e Gupta, 2014). Outra prática comum que será utilizada neste estudo é a penalidade por falta de produto entregue, conhecida como Back Order Penalty, que representa o custo da quantidade de produto que não foi entregue segundo a previsão de vendas, sendo diretamente relacionado ao custo do produto e à quantidade não entregue.

Assim sendo, na Tabela 5.6 encontram-se as regras e custos específicos que serão utilizados nesse estudo. O custo final do produto apresentado na Tabela 5.6 refere-se ao custo relativo à matéria prima utilizada e sua origem (Tabelas 5.1 e 5.2) somado ao tempo de processamento (custo de produção) mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.6: Estrutura de custos

Tipo de custo	Custo ou Regra
Produção	\$20 / hora
Armazenamento	30% do custo final do produto excedente em estoque para o mês
Penalidade	70% do custo final do produto não entregue no mês

5.4. Objetivos do Problema

Conforme discutido nos capítulos anteriores, o problema de cadeia de suprimentos envolvido nesse exemplo mostrado possui grande complexidade, uma vez que contém grande número de variáveis de decisão, variações consideráveis de demanda, a relação entre planejamento e sequenciamento e a forma como se lida com o tempo. Todos esses fatores contribuem para que um modelo de solução puramente matemático (MILP) não seja o mais apropriado.

Dessa forma, segue abaixo o que se tem como objetivo na resolução do exemplo proposto, utilizando as duas abordagens mencionadas no Capítulo 3:

- 1) Maximização do plano de atendimento (PA) – O plano de atendimento é a divisão entre a quantidade produzida pela quantidade vendida. Teoricamente esse valor deve ser de 100% (Menor que 100%, falta produto ao mercado e maior que 100% acarreta em aumento de estoque (custo)). De acordo com a Tabela 5.5, tem-se uma previsão mensal, onde estão detalhadas as quantidades a serem vendidas de cada produto e deverão ser programadas as quantidades e a sequência ótima a fim de se obter também um PA alto.
- 2) Minimizar o custo final: a minimização dos custos durante os doze meses para todos os produtos, que contempla os custos de produção, armazenamento e penalidades;

5.5. Resultados Obtidos

A resolução do exemplo apresentado se deu para a abordagem puramente heurística através de uma planilha em Microsoft Excel, basicamente seguindo o fluxo proposto no capítulo 4. Seu tempo de resolução foi de 30 minutos, ou seja, baixo esforço computacional, podendo ser avaliado o andamento dos resultados ao longo do problema.

Já para a abordagem híbrida houve também uso de uma planilha em Microsoft Excel, porém com uso do Solver do Excel para resolução do problema de Lot sizing (alocação de lotes) para a etapa de planejamento e uma macro em VBA para integrar o sequenciamento de forma hierarquizada retroalimentando o planejamento. O

tempo de solução para essa abordagem 1,5 horas (utilizando um processador Intel® i7, 2.5 GHz e memória RAM de 8GB).

A seguir se encontram as análises referentes aos resultados obtidos por cada abordagem.

Na Tabela 5.7 abaixo é possível ver os resultados iniciais comparativos entre as duas abordagens.

Tabela 5.7: Resultado do exemplo para cada abordagem

Abordagem	Atendimento médio	Atendimento	Custo geral
	mensal	geral	
Regras	87.8%	98.6%	R\$ 764,887.50
Híbrido	88.7%	99.1%	R\$ 794,618.00

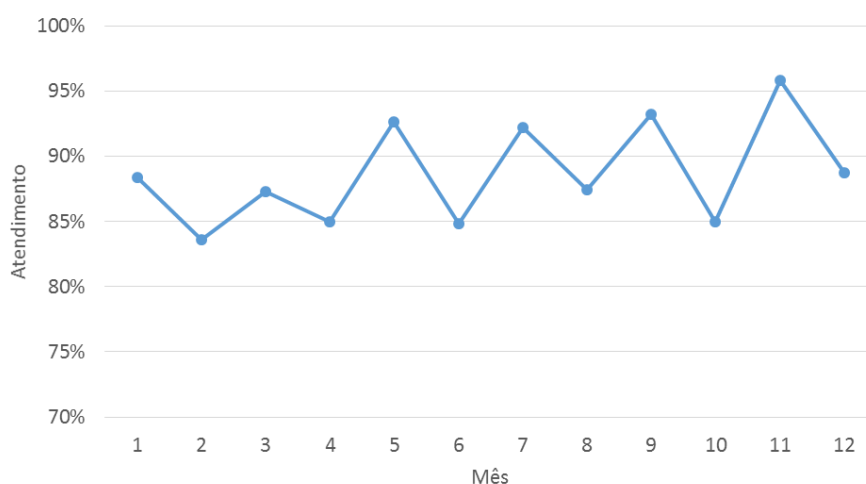
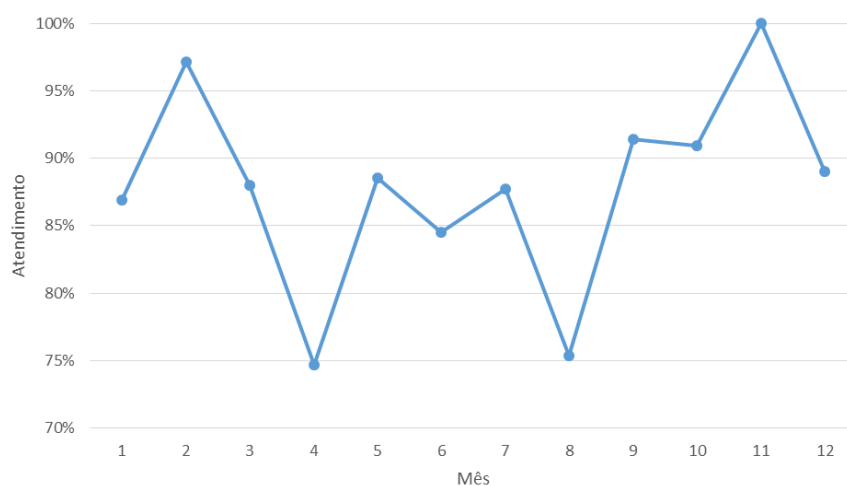
Da Tabela 5.7 é possível notar que não há diferenças significativas nos resultados finais. O modelo híbrido apresenta melhor atendimento, tanto médio mensal quanto geral, porém esses resultados exigem um maior custo, cerca de 5% maior que no modelo por regras.

Na Tabela 5.8 encontram-se os resultados gerais por produto e o quanto se esperava pela previsão de vendas no período de 12 meses.

Tabela 5.8: Atendimento final por produtos

Produto	Atendimento	Atendimento
	- Regras	- Híbrido
P1	100.0%	100.0%
P2	96.5%	98.4%
P3	100.0%	100.0%
P4	100.0%	97.2%
P5	96.4%	100.0%

Da Tabela 5.8 pode-se observar que as abordagens apresentam resultados muito próximos, com o modelo híbrido apresentando pequena superioridade. Nas Figuras 5.8 a 5.13 encontram-se os gráficos com as comparações entre as performances dos dois modelos, observando o atendimento médio mensal geral (Figuras 5.8 e 5.9) e atendimento mensal por produto (Figura 5.10 e 5.11)

Figura 5.8: Atendimento mensal geral do modelo híbrido.**Figura 5.9: Atendimento mensal geral do modelo por regras.**

Analisando as figuras acima é possível ver que, apesar de os resultados das Tabelas 5.7 e 5.8 apresentarem semelhança, as tendências ao longo dos meses são diferentes para os dois modelos. Comparando as Figuras 5.8 e 5.9 nota-se que no modelo híbrido a amplitude de variação do atendimento entre os meses, que aparece entre 85% e 95%, e é menor que no modelo por regras, que chega a ter meses com um atendimento de 75%. Isso se dá pelo efeito da retroalimentação entre o sequenciamento para o planejamento. Esse efeito faz com que, a cada novo mês que se inicia, o planejamento rola o horizonte em busca de se adaptar novamente para obter uma melhor alocação dos produtos e maximizar o plano de atendimento (PA). O modelo de regras, por se basear em regras fixas, fica à deriva da própria demanda mensal. É possível observar este fato

através da demanda para os meses 4 e 8 (Figura 5.7), os quais são pontos de máximo local, e são os meses de menor PA para a abordagem por regras.

Figura 5.10: Atendimento mensal por produto no modelo híbrido.

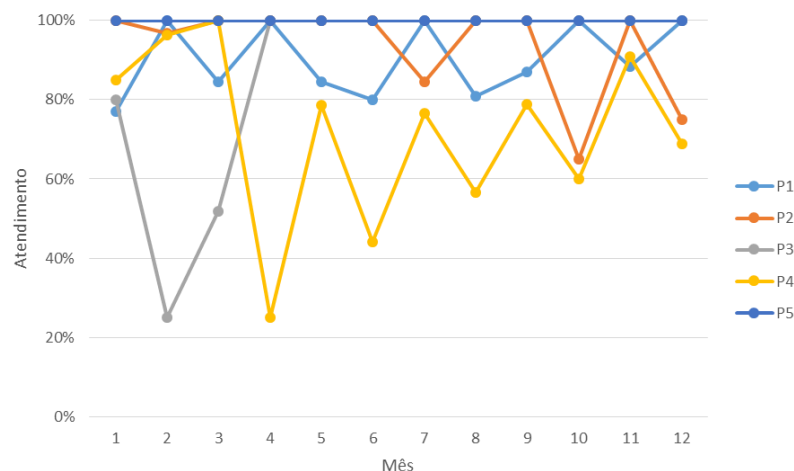
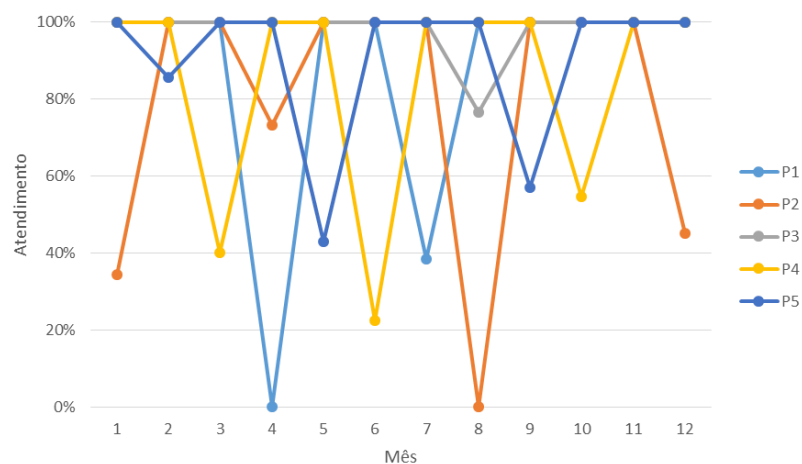


Figura 5.11: Atendimento mensal por produto no modelo por regras.



Quando comparadas as performances de cada produto ao longo dos meses, (Figuras 5.10 e 5.11), é evidente que o modelo híbrido apresenta melhor performance. Obtendo apenas dois eventos de atendimento mensal menor que 40%, a tendência para todos os produtos mostra uma perspectiva de melhora no atendimento ao longo dos meses, com maior estabilização também. Ainda em relação ao modelo híbrido, observa-se que quando há um aumento de demanda geral no mês 4, o modelo de sequenciamento faz com que não sejam priorizados dois produtos porque, de acordo com a heurística do sequenciamento, não faz sentido ser produzido nesse momento em função dos outros

produtos. Nesse quarto mês, por exemplo, o produto P4 é o que ficou com a menor quantidade produzida.

O modelo por regras, por sua vez, apresenta um perfil de cada produto ao longo dos meses diferente do híbrido. É possível ver que alguns produtos chegaram a ficar sem produzir mesmo tendo demanda no mês. Devido ao modelo por regras não ter priorização, mas sim obedecer sempre a mesma regra de sequência de produtos, não significa que faltará produto, somente será atrasado até que chegue sua vez na ordem de produção. Para um negócio, esse efeito pode ser devastador, ao ponto de se perder um cliente por não conseguir atender a demanda.

Quando comparados os dois modelos aqui discutidos com modelos puramente matemáticos, como o MILP, há uma importante observação a ser feita: ambos os modelos tiveram resposta viável. Um problema dessa complexidade pode levar um modelo MILP a um caminho que não seja possível obter uma resposta. A nível corporativo, como já discutido no capítulo 3, isso não é aceitável. O que foi visto nesse exemplo de aplicação é que por mais simples que seja um modelo por regras, ele é eficiente o bastante para gerar pelo menos uma resposta com um plano de produção em um tempo curto.

Pode-se concluir que para o estudo de caso proposto, as duas soluções são equivalentes, apresentando resultados gerais bem próximos. Mesmo que o modelo híbrido apresenta maior estabilidade ao longo dos meses, o custo para se elaborar um algoritmo como o proposto e implementá-lo não justifica o pequeno ganho frente ao modelo por regras, que é mais simples. A maior vantagem do modelo híbrido está na estabilidade dos planos obtidos, bem como o fato de não ter produtos com 0% de atendimento mensal.

Pensando em aprofundar o exemplo de aplicação e explorar mais as abordagens frente a situações comuns do cotidiano do ambiente de cadeia de suprimentos, dois distúrbios foram propostos ao exemplo.

5.6. Análise dos distúrbios

O primeiro distúrbio a ser avaliado é como o sistema se comporta a uma parada de produção por dez dias. Dessa forma é possível avaliar a consistência do sistema quando há uma redução brusca do tempo disponível para produção. Em nenhum dos modelos houve alteração do algoritmo ou de regras.

Simulando um sistema real de produção, o primeiro distúrbio foi tratado como uma necessidade de parada programada da operação para a realização de uma manutenção. No fim do segundo mês surge a necessidade de que no quarto mês sejam parados 10 dias para o serviço.

Na Tabela 5.9 se encontram os resultados do estudo com o primeiro distúrbio e na Tabela 5.10 os resultados gerais por produto.

Tabela 5.9: Resultado do sistema com o primeiro distúrbio

Abordagem	Atendimento médio mensal	Atendimento geral	Custo geral
Regras	66.80%	96.36%	R\$ 878,325.00
Híbrido	83.14%	97.50%	R\$ 893,603.75

Tabela 5.10: Atendimento final por produtos com o primeiro distúrbio

Produto	Atendimento - Regras	Atendimento - Híbrido
P1	98.40%	100.00%
P2	91.14%	98.42%
P3	100.00%	100.00%
P4	92.25%	88.93%
P5	100.00%	100.00%

Pode-se observar das Tabelas 5.9 e 5.10 novamente uma melhor performance do modelo híbrido em relação ao modelo por regras, dessa vez mais evidente, principalmente analisando os dados de atendimento médio mensal e atendimento final por produtos. A diferença de custo é de aproximadamente 2% maior para o modelo híbrido.

Para avaliar os dois modelos nas Figuras de 5.12 a 5.15 encontram-se os gráficos de performance (semelhante ao exemplo inicial).

Figura 5.12: Atendimento mensal geral do modelo híbrido com o primeiro distúrbio.

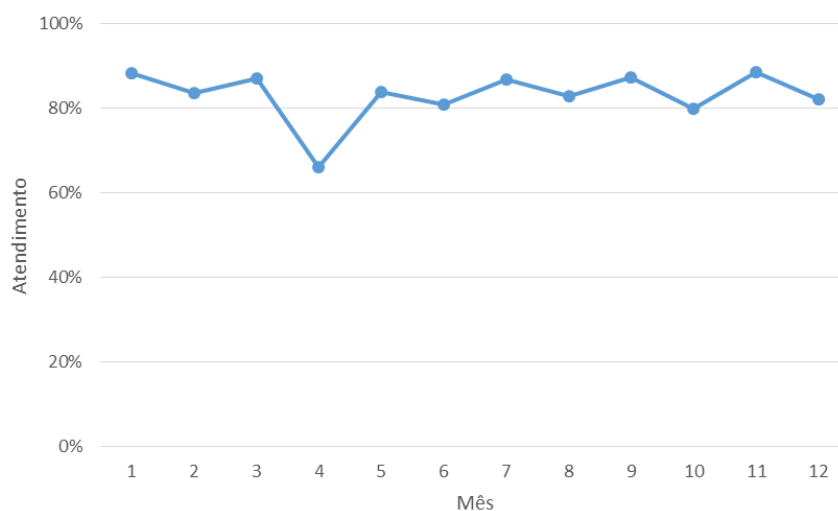
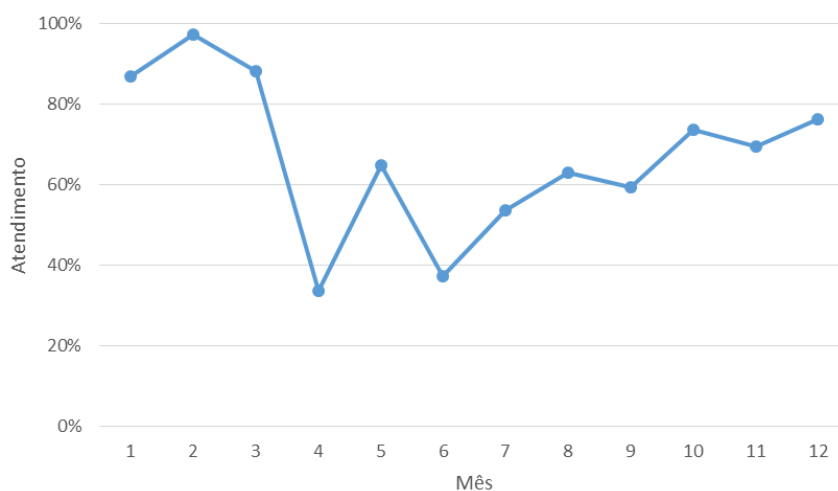


Figura 5.13: Atendimento mensal geral do modelo por regras com o primeiro distúrbio.



Avaliando as tendências mensais de atendimento por modelos, o modelo híbrido apresenta maior estabilidade. As Figuras 5.12 e 5.13 mostram a diferença entre como cada modelo reage ao impacto de se perder 10 dias de produção ao longo do resto dos meses. O modelo híbrido consegue se recuperar mais rapidamente, voltando a um patamar acima de 80% já no mês seguinte após a parada, enquanto o modelo por regras atinge valores de 40% por dois meses e praticamente apenas no 12º mês volta a um valor próximo aos 80%.

Figura 5.14: Atendimento mensal por produto no modelo híbrido com o primeiro distúrbio

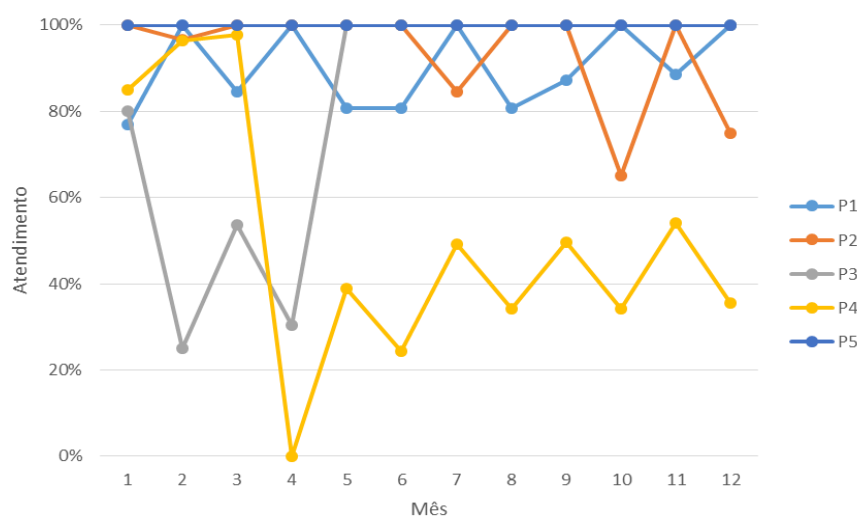
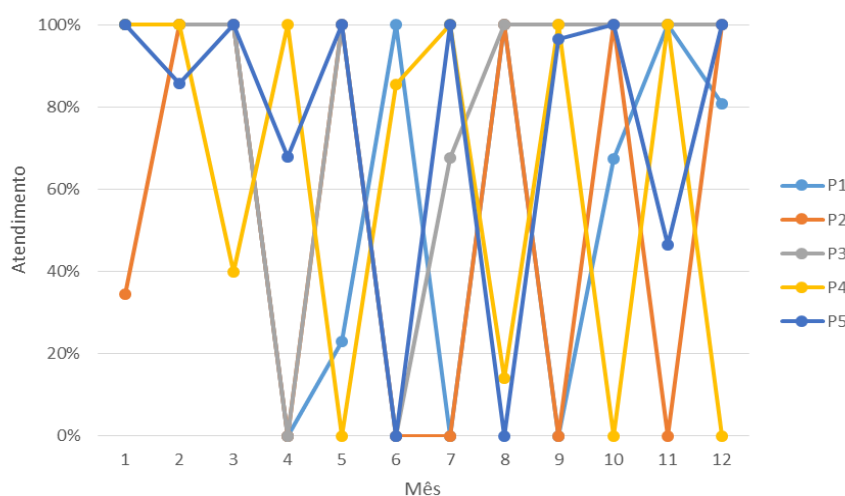


Figura 5.15: Atendimento mensal por produto para o modelo por regras com o primeiro distúrbio.



Salientando o que já foi discutido previamente nesse capítulo, os efeitos observados nesse distúrbio fazem sentido com o esperado por cada modelo. A retroalimentação do sequenciamento faz com o planejamento se antecipe ao evento e já planeje de forma diferente por conta do evento de parada de produção. Essa reorganização faz com que a alocação dos produtos não seja idêntica à demanda, maximizando o atendimento médio mensal. Já o modelo por regras é refém da demanda e produz sempre

na mesma sequência de produtos. Dessa forma, o tempo que esse modelo leva para voltar a um patamar maior de atendimento é maior que para o modelo híbrido.

Das Figuras 5.14 e 5.15 pode-se observar que o modelo híbrido basicamente sacrifica um produto para dedicar mais tempo aos demais, P4, sendo esse o único produto nesse modelo a atingir 0% de entrega ao longo dos 12 meses. Por sua vez, o modelo por regras apresenta a partir do quarto mês pelo menos um produto com 0% de atendimento.

Com esse distúrbio, fica claro a estabilidade, principalmente em um contexto geral, do modelo híbrido, que respondeu quase que imediatamente à parada de produção. O sistema estabelecido pelo feedback entre sequenciamento e planejamento propicia maior estabilidade ao plano, uma vez que um novo cenário futuro é gerado a cada mês seguinte. Portanto, é possível concluir que o modelo híbrido possui um comportamento mais adequado quando exposto a um distúrbio real, como uma parada de produção, por exemplo. Para uma cadeia de suprimentos integrada, a falta de atendimento constante, como ocorre no modelo por regras, pode acarretar sérios problemas comerciais, até mesmo na perda do cliente.

O segundo distúrbio apresentado apresenta um racional semelhante ao do primeiro, visando aproximação da realidade. O caso apresentado é de um aumento repentino de demanda de um produto. Esse distúrbio visa analisar como se comportam os sistemas quando de repente ocorre uma sobrecarga na quantidade a ser produzida mensalmente. Para esse estudo de caso, foi definido que a partir do quinto mês, o produto P5 passa a ter um aumento de 50% na sua demanda mensal.

Nas Tabelas 5.11 encontram-se os resultados finais do segundo distúrbio e na Tabela 5.12 estão os resultados gerais por produto.

Através das Tabelas 5.11 e 5.12 é possível ver mais uma vez a maior consistência do modelo híbrido quando comparado ao modelo por regras, em vários aspectos. No atendimento mensal, por exemplo, há uma diferença de 14% a mais na média de entregas mensais e no geral é maior em 2%. Quando analisadas as performances por produto nota-se que o modelo híbrido opta por não priorizar novamente o produto P4, para poder maximizar o atendimento dos outros 4 produtos. Já o modelo por regras obtém um desempenho mediano em três produtos e acima de 95% para os restantes. Nas Figuras 5.16 a 5.19 encontram-se os gráficos de performance como para os outros casos mostrados anteriormente.

Tabela 5.11: Resultado após o segundo distúrbio.

Abordagem	Atendimento médio mensal	Atendimento geral	Custo geral
Regras	68.40%	93.33%	R\$ 925,962.92
Híbrido	82.64%	95.20%	R\$ 954,914.17

Tabela 5.12: Resultados gerais por produto após o segundo distúrbio.

Produto	Atendimento - Regras	Atendimento - Híbrido
P1	100.00%	100.00%
P2	93.67%	100.00%
P3	84.38%	100.00%
P4	97.97%	75.83%
P5	90.63% /	100.00%

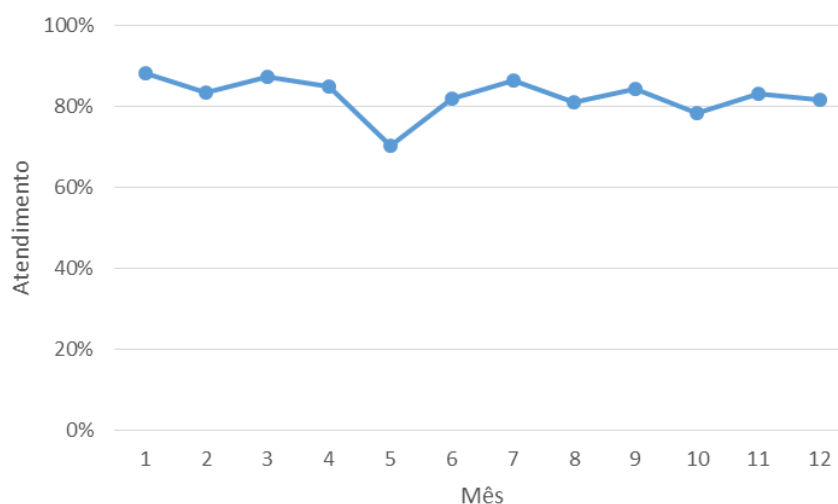
Figura 5.16: Atendimento mensal geral do modelo híbrido com o segundo distúrbio.

Figura 4.17: Atendimento mensal geral do modelo por regras com o segundo distúrbio.

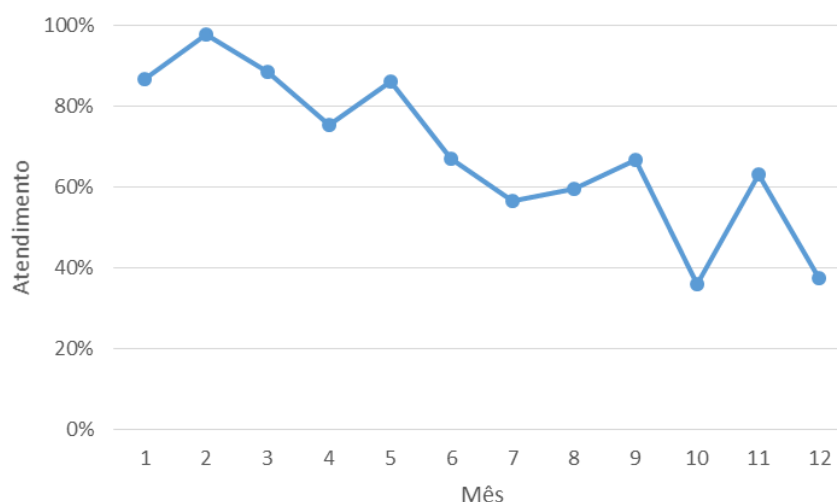
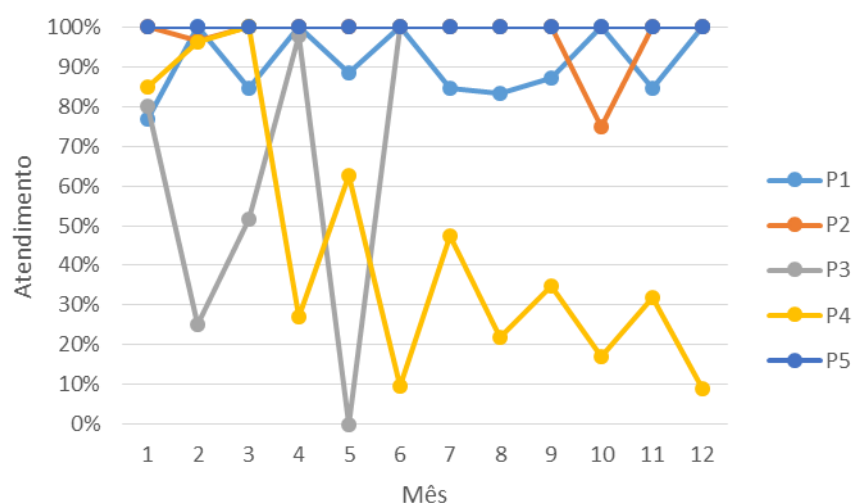
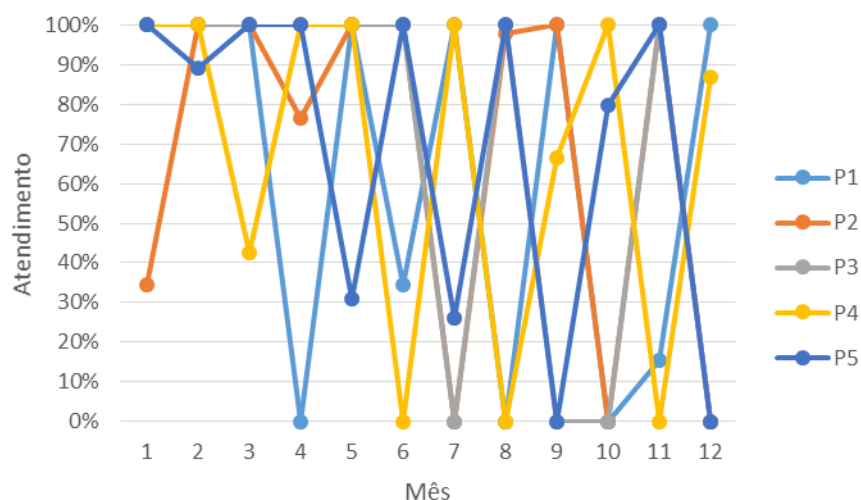


Figura 4.18: Atendimento mensal por produto para o modelo híbrido com o segundo distúrbio.



Nota-se a maior estabilidade do modelo híbrido quanto ao atendimento médio mensal. Depois do quinto mês, quando ocorre o aumento da demanda de P5 em 50%, o modelo híbrido apresenta estabilidade, mantendo um patamar ao redor de 80%. Com o aumento da demanda, o tempo compartilhado entre os cinco produtos fica ainda mais restrito. Portanto o modelo híbrido opta por “sacrificar” um dos produtos para maximizar o atendimento dos demais. Na Figuras 5.18 fica evidente que o produto P4 não foi priorizado. Isso ocorre devido ao modo como as restrições foram impostas e como a função objetivo está estabelecida para o sistema, que para o presente estudo optou-se pelo atendimento médio mensal, conforme dito anteriormente.

Figura 4.19: Atendimento mensal por produto para o modelo por regras com o segundo distúrbio.



Se comparado ao modelo por regras, é perceptível na Figura 5.17 uma curva decrescente a partir do mês 5, o que mostra certo descontrole, voltando a se estabelecer nos últimos três meses por volta de 40 a 60%. É possível ver inclusive que a instabilidade mencionada se reflete por diversos meses com produtos apresentando entregas iguais a 0%, o que pode acabar com um negócio.

Uma vantagem do modelo híbrido nesse distúrbio é a possibilidade de se antecipar à possibilidade de falta de capacidade de atendimento. No caso da Figura 5.18, onde a curva de atendimento mensal do produto P4 apresenta mais de três meses consecutivos em queda, o que na projeção que o horizonte rolante faz (durante o algoritmo de planning e scheduling) já mostraria, enquanto o modelo por regras sentiria essa falta de capacidade praticamente no momento em que houvesse o aumento de demanda.

Portanto, através do estudo de caso e dos dois distúrbios provocados no sistema é possível ver maior consistência do modelo híbrido proposto nos três casos, mais evidente nos distúrbios. Teoricamente, um modelo por regras realmente não é eficaz quando exposto a situações que fogem da sua normalidade, uma vez que para que as regras fossem geradas, essas são costumeiramente baseadas em observações sobre o sistema em seu modo contínuo e estacionário. Por isso é possível perceber que no estudo de caso o modelo por regras se adequa quase tão bem quanto o híbrido. Entretanto, os distúrbios como os dois apresentados são muito comuns no mundo industrial.

Logicamente o modelo híbrido possui diversas oportunidades de melhorias, como por exemplo o fato de não priorizar um dos produtos em detrimento da maximização do atendimento dos demais, mas assim como o simples modelo por regras, ambos atendem às duas questões principais do estudo, pois entregam uma solução aceitável e em tempo hábil, permitindo do ponto de vista do usuário desse sistema, ter informações suficientes para auxiliar sua tomada de decisão.

6. Conclusões

Esta dissertação, conforme estabelecido nas seções anteriores, tenta trazer uma abordagem mais prática a um tema de grande complexidade teórica, devido às enormes interações entre variáveis que tornam sua resolução custosa.

Durante o progresso do trabalho, buscou-se um intermédio entre o desenvolvimento de uma ferramenta para aplicação, proveniente do conhecimento acadêmico, e a aplicação prática, proveniente do ambiente industrial, bem como suas necessidades e dificuldades.

O estudo proposto buscou se aproximar de uma situação real de demanda e produção, bem como os métodos de solução escolhidos. Em indústrias de baixa complexidade ou até mesmo nas de grande complexidade, porém sem investimento em conhecimento de sistemas de cadeia de suprimentos, as tomadas de decisão são baseadas em regras determinadas por especialistas ou cenários históricos muito comuns. De forma análoga, modelar um sistema inteiro e resolvê-lo puramente por programação matemática pode não ser a alternativa mais viável. Portanto, modelos híbridos como o proposto nesse trabalho fazem sentido quando se espera uma solução viável e com um tempo de resposta adequado.

Através do problema proposto e dos distúrbios provocados no sistema é possível ver maior consistência do modelo híbrido proposto nos dois casos, mais evidente nos distúrbios. Teoricamente, um modelo por regras realmente não é eficaz quando exposto a situações que fogem da sua normalidade, uma vez que para que as regras fossem geradas, essas são costumeiramente baseadas em observações sobre o sistema em seu modo contínuo e estacionário. Por isso é possível perceber que no estudo de caso o modelo por regras se adequa quase tão bem quanto o híbrido. Entretanto, um distúrbio como o apresentado é muito comum no mundo industrial, exigindo das equipes que lidam com problemas de cadeia de suprimentos métodos robustos para se adequar às mudanças prováveis.

Como oportunidade para próximos trabalhos, pode-se trabalhar no modelo híbrido, uma vez que este possui diversas oportunidades de melhorias, como por exemplo o fato de não priorizar um dos produtos em detrimento da maximização do atendimento dos demais.

7. Referências Bibliográficas

ARNOLD, J. R. T. **Administração de materiais**. Editora Atlas. 1ª ed, 2011.

BAKER, K. R.; KELLER, B. **Solving the single machine sequencing problem using integer programming**. Computers & Industrial Engineering, 59, p. 730-735, 2010.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Boockman, 2006.

CHITALE, A. K.; GUPTA, R. C. **Materials management: A supply chain perspective (Text and Cases)**. PHI Learning Private, 3ªed, 2014.

CROXTON, K. L.; GARCIA - DASTUGUE, S. J.; LAMBERT, D. M.; ROGERS, D. S. **The supply chain management processes**, The International Journal of Logistics Management, Vol. 12, No. 2, p.13–36, 2001.

EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. **Optimization of chemical process**. McGraw – Hill, 2ª ed, 2001.

GROSSMANN, I. E. **Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global cycle life assessment**. Computers and Chemical Engineering, 29, p. 29-39, 2004.

GROSMANN, I. E.; VAN DER HEEVER, S. A.; HARJUNKOSKI, I. **Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling**. AIChE Symposium Series, 98, p.150, 2002.

GUILLÉN, G.; BADELL, M.; ESPUÑA, A.; PUIGJANER, L. **Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains.** Computers and Chemical Engineering, 30, p. 421-436, 2006.

HEISIG, P.; CLARKSON, P. J.; VAJNA, S. **Modelling and Management of Engineering Process.** Springer. 2010.

HUGOS, M. **Essentials of supply chain management.** John Wiley & Sons, 1^a ed, 2003.

JENSEN, I. G.; MÜNSTER, M.; PISINGER, D. **Optimizing the supply chain of biomass and biogas for a single plant considering mass and energy losses.** European Journal of Operational Research, 262, p. 744-758, 2017.

KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. **The capacitated lot size problem: a review of models and algorithms.** Omega, 31, p. 365-378, 2003.

LAND, A. H; DOIG, A. G. **An automatic method of solving discrete programming problems.** Econometrica. 28 (3). p. 497–520, 1960.

LASSCHUIT, W.; THIJSEN, N. **Supporting supply chain planning and scheduling decisions in the oil and chemical industry.** Computers and Chemical Engineering, 28, p.863-870, 2004.

LIU, S.; PAPAGEORGIOU, L. G. **Multiobjective optimization of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry.** Omega, 41, p. 369-382, 2013.

MARAVELIAS, C. T.; SUNG, C. **Integration of production planning and scheduling: overview, challenges and opportunities.** Computers and Chemical Engineering, 33, p. 1919-1930, 2009.

MARCHETTI, P. A.; ZAMARRIPA, M. A.; GROSSMANN, I. E.; BUCEY, W.; MAJEWSKI, R. A. **Optimal planning and feedstock-mix selection for multiproduct polymer production.** Computers and Chemical Engineering, 95, p. 182-201, 2016.

MONTESCO, R. A. E. **Análise da integração de sistemas hierárquicos para planejamento e programação da produção.** Tese de doutorado, Campinas, 2010.

PAPAGEORGIOU, L. G. **Supply chain optimization for the process industry: Advances and opportunities.** Computers and Chemical Engineering, 33, p. 1931-1938, 2009.

QIN, H., ZHANG, Z., LIM, A., LIANG, X. **An enhanced branch-and-bound algorithm for the talent scheduling problem.** European Journal of Operational Research, 250 (2), p.412-426, 2016.

RAO, S. S. **Engineering optimization : theory and practice**, 4thed, John Wiley & Sons, 2009.

ROSSI, F.; MANENTI, F.; REKLAITIS, G. **A general modular framework for the integrated optimal management of an industrial gases supply-chain and its production systems.** Computers and Chemical Engineering, 82, p.84-104, 2015.

SHAH, N. **Process industry supply chains: key issues and strategies for optimization.** Computers and Chemical Engineering, 28, p.929-941, 2005.

SHAH, N.; IERAPETRITOU, M. G. **Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry.** Computers and Chemical Engineering, 37, p. 214-226, 2012.

SHAIK, M. A.; FLOUDAS, C. A.; KALLRATH, J.; PITZ, H.J. **Production scheduling of a large-scale industrial continuous plant: Short-term and medium-term scheduling.** Computers and Chemical Engineering, 33, p.670-686, 2009.

SHAPIRO, J. F. **Modeling the supply chain.** Pacific Grove, CA: Duxbury, 2000.

SIMCHI-LEVI, D; KAMINSKY, P; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies.** McGraw-Hill/Irwin, 1^a ed, 1999.

STADTLER, H.; KILGER, C. **Supply chain management and advanced planning.** 3^aed, Springer, 2004.

TAN, K. C. **A framework of supply chain management literature.** European Journal of Purchasing & Supply Management, 7, p. 39-48, 2001.

VELEZ, S.; MARAVELIAS, C. T. **A branch-and-bound algorithm for the solution of chemical production scheduling MIP models using parallel computing.** Computers and Chemical Engineering, 55, p. 28-39, 2013.

WAGNER, H.M.; WITHIN, T. **Dynamic version of the economic lot size model.** Management Science, Vol. 5, p. 89–96, 1958

WU, D.; IERAPETRITOU, M. G. **Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty**, Chemical engineering process, 46, p. 1129-1140, 2007.

WU, D.; IERAPETRITOU, M. G. **Decomposition approaches for the efficient solution of short-term scheduling problems**. Computers and Chemical Engineering, 27, p. 1261-1276, 2003.